



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**Desarrollo de un producto fortificado y deshidratado  
como alternativa para la generación de valor  
agregado a la papa (*Solanum tuberosum*) variedad  
Diacol Capiro**

**Yudy Stella Duarte Correa**

**Universidad de Antioquia**

**Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias**

**Departamento de Alimentos**

**Medellín, Colombia**

**2019**



Desarrollo de un producto fortificado y deshidratado como alternativa para la generación de valor agregado a la papa (*Solanum tuberosum*) variedad Diacol Capiro

**Yudy Stella Duarte Correa**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Doctora en Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias**

Asesores:

Diana María Granda Restrepo.

Doctora en Ciencias, línea envases para alimentos. CIAD, México

Oscar Alfonso Vega Castro

Doctor en Ingeniería. Universidad de Antioquia, Colombia

Línea de Investigación:

Evaluación y Control de Tratamientos Tecnológicos

Grupo de Investigación:

BIOALI (Biotecnología de Alimentos)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias

Departamento de Alimentos

Medellín, Colombia

2019

ESTA TESIS FUE FINANCIADA A TRAVÉS DE LA CONVOCATORIA 727 DE 2015 (DOCTORADOS NACIONALES) DEL DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN (COLCIENCIAS).

*A mis abuelos*

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	19
1.1 Planteamiento del Problema.....	21
1.2 Objetivos .....	23
1.2.1 Objetivo General .....	23
1.2.2 Objetivos Específicos .....	23
2. MARCO TEÓRICO .....	24
2.1 Generalidades del cultivo de papa.....	24
2.1.1 Producción de papa en el mundo.....	26
2.1.2 Producción de papa en Colombia.....	27
2.2 Fortificación de Alimentos.....	29
2.2.1 Impregnación al vacío en alimentos porosos .....	30
2.2.2 Aplicaciones de la Impregnación al vacío en papa .....	33
2.3 Compuestos Fisiológicamente Activos .....	35
2.3.1 Calcio .....	35
2.3.2 Vitamina E.....	37
2.3.3 Vitamina C .....	38
2.4 Secado de alimentos .....	39
2.4.1 Secado convectivo.....	39
2.4.2 Liofilización .....	41
2.4.3 Microondas al vacío .....	42
2.5 Métodos <i>in vitro</i> para estudios de digestibilidad.....	43
2.5.1. Bioaccesibilidad y biodisponibilidad .....	47
2.5.2. Digestibilidad de almidón .....	48
3. METODOLOGÍA .....	50
3.1 Materia prima .....	52
3.1.1 Pretratamiento .....	52
3.2. Etapa 1. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico N°1. ....	53
3.2.1 Caracterización fisicoquímica .....	53
3.2.2. Contenido fenólico total y capacidad antioxidante de la papa fresca y los chips de papa deshidratados.....	54
3.2.2.1 Contenido Fenólico Total (TPC).....	55

3.2.2.2 FRAP.....	55
3.2.2.3 ORAC.....	56
3.2.3 Caracterización térmica de la papa cruda.....	56
3.2.4 Caracterización microestructural de la papa cruda, escaldada y los chips deshidratados	57
3.3. Etapa 2. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico N°2. ....	58
3.3.1 Impregnación al vacío con solución isotónica de cloruro de sodio (NaCl).....	58
3.3.2 Impregnación al vacío con emulsión de fortificación .....	59
3.3.2.1 Preparación de la emulsión de impregnación.....	60
3.3.2.2 Caracterización de la emulsión de impregnación.....	60
3.3.3 Deshidratación de las rodajas de papa fortificadas.....	61
3.3.3.1 Secado por aire caliente (HAD) .....	61
3.3.3.2 Secado por liofilización (FD).....	62
3.3.3.3 Secado por microondas al vacío (MVD).....	62
3.3.4 Cuantificación de calcio y vitaminas C y E en papa fresca, impregnada y deshidratada.	63
3.3.5 Análisis sensorial multidimensional de chips deshidratados.....	63
3.3.6 Selección de un proceso de secado.....	64
3.4. Etapa 3. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico N°3. ....	64
3.4.1 Preparación de las rodajas de papa fortificadas.....	64
3.4.2 Secado por microondas al vacío de la papa fortificada .....	65
3.4.3 Características texturales de los chips de papa deshidratados.....	65
3.4.4 Características nutricionales de los chips de papa deshidratados: lisina disponible .....	66
3.4.5 Análisis Proximal de los chips de papa deshidratados con las condiciones óptimas de secado.....	67
3.4.6. Análisis sensorial multidimensional de los chips de papa deshidratados con las condiciones óptimas de secado.....	67
3.5. Etapa 4. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico N°4. ....	67
3.5.1. Estabilidad de compuestos adicionados durante el almacenamiento .....	68
3.5.2 Digestibilidad del almidón .....	69
3.5.2.1 Preparación de chips sin fortificar (SF).....	69
3.5.2.2 Digestibilidad <i>in vitro</i> del almidón.....	69
3.5.2.3 Determinación de las propiedades de empastamiento.....	71
3.5.2.4 Determinación del poder de hinchamiento y solubilidad .....	72
3.5.2.5 Determinación del índice glucémico estimado (eGI).....	72
3.5.2.6 Características microestructurales de la digesta.....	73

3.5.3 Estimación de la bioaccesibilidad de los compuestos adicionados .....	73
3.6 Diseño experimental y Análisis estadístico.....	75
3.6.1 Diseño de experimentos para el proceso de impregnación al vacío (Objetivo N°2) .....	75
3.6.2 Diseño de experimentos para el proceso de secado por microondas al vacío (Objetivo N°3) .....	77
3.6.3 Diseño de experimentos para la estabilidad de los Compuestos adicionados durante el almacenamiento (Objetivo N°4).....	78
3.6.4 Análisis estadístico de la digestibilidad <i>in vitro</i> del almidón (Objetivo N°4) .....	79
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	80
4.1. Etapa 1. Objetivo específico N°1 .....	80
4.1.1. Caracterización fisicoquímica .....	80
4.1.2 Contenido fenólico total y capacidad antioxidante de la papa cruda. ....	81
4.1.3 Caracterización térmica de la papa cruda.....	83
4.1.4 Caracterización microestructural de la papa cruda.....	84
4.1.5 Relevancia de los resultados obtenidos .....	85
4.2. Etapa 2. Objetivo específico N°2 .....	86
4.2.1 Resultados del diseño de experimentos de Impregnación al vacío con solución isotónica de NaCl.....	86
4.2.2 Impregnación al vacío con emulsión de fortificación .....	95
4.2.3 Caracterización de la emulsión de fortificación .....	96
4.2.4 Fortificación de las rodajas de papa .....	97
4.2.5 Deshidratación de las rodajas de papa fortificadas.....	99
4.2.6 Análisis microestructural de los chips de papa fortificados .....	102
4.2.7 Análisis sensorial multidimensional de los chips de papa fortificados .....	104
4.2.8 Relevancia de los resultados obtenidos .....	106
4.3. Etapa 3. Objetivo específico N°3 .....	107
4.3.1 Fortificación con las condiciones óptimas de impregnación.....	107
4.3.2 Resultados del diseño de experimentos del proceso de secado por microondas al vacío .....	108
4.3.3 Análisis Proximal de los chips de papa deshidratados con las condiciones óptimas de secado.....	120
4.3.4 Análisis Sensorial por aproximación multidimensional de los chips de papa deshidratados con las condiciones óptimas de secado .....	121
4.3.5 Relevancia de los resultados obtenidos .....	123
4.4. Etapa 4. Objetivo específico N°4 .....	123

4.4.1 Estabilidad de compuestos adicionados durante el almacenamiento .....	123
4.4.2 Digestibilidad del almidón .....	126
4.4.2.1 Contenido de calcio y vitaminas C y E en los chips sin fortificar .....	126
4.4.2.2 Digestibilidad in vitro del almidón.....	126
4.4.2.3 Propiedades de empastamiento .....	129
4.4.2.4 Poder de hinchamiento y solubilidad .....	133
4.4.2.5 Índice glucémico estimado.....	134
4.4.2.6 Características microestructurales de la digesta.....	136
4.4.3 Estimación de la bioaccesibilidad de los compuestos adicionados .....	139
4.4.3.1 Estimación de la bioaccesibilidad del calcio.....	139
4.4.3.2 Estimación de la bioaccesibilidad de la vitamina C .....	141
4.4.3.3 Estimación de la bioaccesibilidad de la vitamina E .....	142
4.4.5 Relevancia de los resultados obtenidos .....	143
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	145
6. REFERENCIAS.....	148
ANEXO 1.....	174
ANEXO 2.....	175
ANEXO 3.....	178
ANEXO 4.....	179
ANEXO 5.....	181
ANEXO 6.....	183
ANEXO 7.....	186
ANEXO 8.....	187
ANEXO 9.....	191
ANEXO 10.....	198
ANEXO 11.....	201
ANEXO 12.....	202
ANEXO 13.....	203



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones experimentales para el proceso de impregnación al vacío (IV). .....	76
Tabla 2. Condiciones experimentales para el proceso de secado por microondas al vacío (MVD)..	78
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica papa variedad Diacol Capiro. ....	80
Tabla 4. Contenido fenólico total y capacidad antioxidante de papa cruda. ....	82
Tabla 5. Resultados del diseño experimental para el proceso de Impregnación al vacío (IV). .....	87
Tabla 6. ANOVA del diseño experimental para el proceso IV. ....	88
Tabla 7. Parámetros estimados y experimentales obtenidos con las condiciones óptimas de impregnación. ....	95
Tabla 8. Humedad y actividad de agua de la papa fresca, impregnada y deshidratada con los diferentes métodos. ....	100
Tabla 9. Resultados del diseño experimental para el proceso de secado por microondas al vacío (MVD) (I). ....	109
Tabla 10. Resultados del diseño experimental para el proceso de secado por microondas al vacío (MVD) (II). ....	110
Tabla 11. ANOVA del diseño experimental para el proceso MVD. ....	110
Tabla 12. Composición proximal de los chips fortificados y deshidratados con las condiciones óptimas. ....	121
Tabla 13. Propiedades de empastamiento de los chips fortificados (F) y sin fortificar (SF). ....	130
Tabla 14. Bioaccesibilidad de compuestos fortificantes. ....	139

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de papa.....	24
Figura 2. Morfología del tubérculo de papa.....	25
Figura 3. Producción de papa 1980 - 2017.....	27
Figura 4. Principales Departamentos productores de papa en Colombia.....	28
Figura 5. Papa variedad Diacol Capiro.....	29
Figura 6. Mecanismo de IV en un poro ideal.....	31
Figura 7. Tracto gastrointestinal.....	44
Figura 8. Modelos dinámicos de digestión in vitro.....	46
Figura 9. Diagrama general de la investigación.....	50
Figura 10. Preparación de las rodajas.....	53
Figura 11. Microscopio Electrónico de Barrido utilizado en los análisis.....	57
Figura 12. Equipo utilizado para la determinación de los parámetros característicos de impregnación.....	58
Figura 13. Equipo utilizado para el secado por aire caliente de las rodajas de papa fortificadas.....	61
Figura 14. Equipo utilizado para la liofilización de las rodajas de papa fortificadas.....	62
Figura 15. Representación del equipo utilizado para la deshidratación por microondas a vacío de las rodajas de papa fortificadas.....	63
Figura 16. Representación del sistema utilizado para la fortificación de las rodajas de papa con las condiciones óptimas de impregnación.....	65
Figura 17. Equipo utilizado para realizar los ensayos de punción de los chips fortificados.....	66
Figura 18. Empaque utilizado para el almacenamiento de las muestras.....	68
Figura 19. Muestras para análisis de estabilidad de compuestos adicionados.....	68
Figura 20. Reactor de vidrio utilizado para evaluar la hidrólisis de almidón.....	70
Figura 21. Rapid Visco Analyzer utilizado para las mediciones.....	71
Figura 22. Simulador de Digestión Humano utilizado.....	74
Figura 23. Termograma obtenido por DSC para la papa variedad Diacol Capiro.....	83
Figura 24. Micrográficas obtenidas para la papa cruda (a,b) y escaldada (c,d).....	85
Figura 25. Muestras de papa durante el proceso IV.....	86
Figura 26. Gráfica MSR (a) y efectos principales para $X_1$ (b).....	89
Figura 27. Gráfica MSR (a) y efectos principales para $X$ (b).....	90
Figura 28. Gráfica MSR (a) y efectos principales para $\epsilon_e$ (b).....	92
Figura 29. Emulsión de fortificación realizada.....	96

Figura 30. Distribución de tamaño de partícula de la emulsión de impregnación por intensidad (a) y por volumen (b).....	97
Figura 31. Sistema de impregnación al vacío con la emulsión de fortificación.....	98
Figura 32. Chips fortificados y deshidratados mediante secado por microondas al vacío (MVD)(a), secado por aire caliente (HAD)(b) y secado por liofilización (FD)(c).....	99
Figura 33. Contenido de calcio, vitamina C y vitamina E en papa fresca (FP), papa impregnada (IP) y papa deshidratada mediante liofilización (FD), microondas al vacío (MVD) y secado por aire caliente (HAD). .....	101
Figura 34. Micrografías SEM para las papas impregnadas y deshidratadas obtenidas por liofilización (FD) (a-c), microondas al vacío (MVD) (d-f) y secado por aire caliente (HAD) (g-i). .....	103
Figura 35. Resultados del análisis sensorial por aproximación multidimensional para textura (a), sabor (b) y olor (c) para los chips obtenidos mediante secado por aire caliente (HAD), liofilización (FD) y microondas (MVD). .....	105
Figura 36. Gráfica MSR (a) y efectos principales (b) para el Tiempo de secado. ....	111
Figura 37. Gráfica MSR (a) y efectos principales (b) para la Vitamina E. ....	114
Figura 38. Gráfica MSR (a) y efectos principales (b) para la Vitamina C.....	114
Figura 39. Chips obtenidos con las condiciones óptimas de secado. ....	120
Figura 40. Perfil sensorial multidimensional de los chips obtenidos con las condiciones óptimas de MVD. ....	122
Figura 41. Estabilidad de calcio (a), vitamina C (b) y vitamina E (c) para los chips de papa fortificados y deshidratados con las condiciones óptimas de secado MVD.....	124
Figura 42. Hidrólisis de almidón de los chips fortificados (F) y sin fortificar (SF).....	127
Figura 43. Diagrama de pared celular mostrando lamela media y pared celular primaria y secundaria.....	129
Figura 44. Perfil de empastamiento RVA de los chips fortificados (F) y sin fortificar (SF). ....	130
Figura 45. Perfiles de empastamiento para almidón de papa (A) y materia seca de la papa (B). ...	131
Figura 46. Poder de hinchamiento (a) y Solubilidad (b) de los chips de papa fortificados (F) y sin fortificar (SF). .....	134
Figura 47. Micrografías SEM de chips sin fortificar (SF) (a, c, e, g) y fortificados (F) (b, d, f h): antes de empezar la digestión (a, b); y después de las etapas G30 (c, d ); I10 (e, f) e I120 (g, h). .	137

## GLOSARIO

**Almidón.** Es el carbohidrato de almacenamiento más común en las plantas y también la mayor fuente de carbohidratos en la alimentación humana. El almidón consta de dos tipos de moléculas: amilosa (polímero lineal de unidades  $\alpha$ -D-glucosa unidas por enlaces glicosídicos  $\alpha$ -1,4) y amilopectina (polímero ramificado de unidades  $\alpha$ -D-glucosa unidos por enlaces glicosídicos  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6) (Singh, Dartois, & Kaur, 2010).

**Bioaccesibilidad.** Se refiere a la liberación de los compuestos nutritivos de la matriz alimentaria en los jugos digestivos del tracto gastrointestinal (Betoret et al., 2015).

**Biodisponibilidad.** Se refiere a la porción de los compuestos nutritivos que una vez liberados, son absorbidos y alcanzan la circulación sistémica (Betoret et al., 2015).

**Digesta.** Consiste en una suspensión de partículas en una fase fluida que transita el tracto gastrointestinal (Lentle & Janssen, 2010) y es producida a través de la degradación enzimática.

**Minerales.** Sustancias inorgánicas necesarias para los procesos fisiológicos y que no son fuente de energía (Ministerio de la Protección Social, 2011).

**Nutriente.** Cualquier sustancia química consumida normalmente como componente de un alimento que aporta energía, o es necesaria para el crecimiento, el desarrollo y/o el mantenimiento de la salud, o cuya carencia hará que se produzcan cambios químicos o fisiológicos característicos (Ministerio de la Protección Social, 2011).

**Nutriente esencial.** Nutriente que no es sintetizado por el organismo o es sintetizado en cantidades insuficientes y que debe ser consumido para garantizar el crecimiento, desarrollo y/o mantenimiento de la salud (Ministerio de la Protección Social, 2011).

**Porcentaje de valor diario (%VD).** El aporte que hace al valor de referencia un determinado nutriente presente en un alimento, expresado en porcentaje (Ministerio de la Protección Social, 2011).

**Snack.** Es definido como una porción de alimento, más pequeño que una comida regular, generalmente consumido entre comidas (Pedreschi, Cortés, & Mariotti, 2018).

**Valores de referencia de nutrientes (VRN) o Valor de referencia.** Nivel de ingesta diario de nutrientes recomendado para mantener la salud de la mayoría de las personas sanas de diferentes grupos de edad y estado fisiológico, utilizado para fines de rotulado nutricional (Ministerio de la Protección Social, 2011).

**Vitaminas.** Sustancias orgánicas esenciales para el mantenimiento de la salud, crecimiento y funcionamiento corporal normal. Se requieren en pequeñas cantidades y no son fuente de energía (Ministerio de la Protección Social, 2011).

## NOMENCLATURA

% SH	Porcentaje de hidrólisis de almidón (total)
% E	Error medio relativo porcentual
Y	Deformación volumétrica al final del proceso IV
Y <sub>1</sub>	Deformación volumétrica al final de la etapa de vacío
ρ <sub>a</sub>	Densidad aparente
ε <sub>e</sub>	Porosidad efectiva
μl	microlitros
ρ <sub>liq</sub>	Densidad del líquido de impregnación
μM	microMolar
ρ <sub>r</sub>	densidad real
ε <sub>r</sub>	porosidad real
AP	Presión absoluta
a <sub>w</sub>	Actividad acosa
BD	Viscosidad Breakdown
bh	base húmeda
bs	base seca
C	Constante de Guggenheim
Ca	Calcio
CFA	Compuestos Fisiológicamente Activos
DRP	Fenómenos de deformación-relajación
eGI	Índice glucémico estimado
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FD	Secado por liofilización
FEDEPAPA	Federación Colombiana de Papa
FV	Viscosidad Final
g	Gramos
GAE	Equivalente ácido gálico
GI	Índice glucémico
GOPOD	Glucosa oxidasa / peroxidasa
Gp	cantidad de glucosa producida (g)
h	Horas
H	Humedad
ha	Hectáreas
HAD	Secado por aire caliente
HDM	Mecanismo Hidrodinámico
HDS	Simulador de digestión humano
HI	Índice de hidrólisis
IV	Impregnación al vacío
K	Factor de corrección (modelo de GAB)
kPa	KiloPascal

kV	Kilovoltio
lys	Lisina
m	Metros
M	Concentración molar
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
min	Min
ml	Mililitros
MSR	Metodología de Superficie de Respuesta
mV	Milivoltios
MVD	Secado por microondas al vacío
mW	milivatio o miliWatt
N	Concentración Normal
nm	Nanómetros
°C	grados Celsius
p/p	Peso/peso
p/v	Peso /volumen
PT	Temperatura de empastamiento
PV	Viscosidad Pico
r	Relación de compresión
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinación
RMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
s	Segundos
SB	Viscosidad Setback
SD	Desviación estándar
SGF	Fluido gástrico (simulado)
Sh	cantidad de almidón hidrolizado (g)
Si	cantidad inicial de almidón (g)
SIF	Fluido intestinal (simulado)
ss	sólido seco
SSF	Fluido salivar (simulado)
TE	Equivalente Trolox
Tf	Temperatura final de la gelatinización
Ti	Temperatura de inicio de la gelatinización
Tp	Temperatura pico de la gelatinización
TPC	Contenido fenólico total
TV	Viscosidad de la pasta caliente
VDR	Valor diario de referencia de nutrientes
VitC	Vitamina C
VitE	Vitamina E
VP	Presión de vacío (en el sistema de impregnación)
W	Watt o vatios
W/g	Watt por gramo
Wc	Trabajo de crocancia
X	Fracción volumétrica de impregnación al final del proceso IV

$x_{CFA}^{\circ}$   
 $x_{CFA}^{IV}$   
 $\gamma^{CFA}$ 

Fracción másica de CFA en la matriz fresca

Fracción másica de CFA en la matriz impregnada

Fracción másica de CFA en el líquido de impregnación



## RESUMEN

Los snack de papa pueden ser usados como una estrategia para el consumo de nutrientes, debido a que son uno de los productos más consumidos a nivel mundial. Debido a que los snack fritos son una fuente significativa de grasa, el consumo está cambiando hacia alternativas más saludables. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la impregnación al vacío y tres métodos de deshidratación: secado por aire caliente, liofilización y microondas al vacío, de chips de papa fortificados con calcio y vitaminas C y E, usando una variedad nacional (Diacol Capiro). La impregnación al vacío y el secado por microondas al vacío fueron evaluados usando una metodología de superficie de respuesta con un diseño central compuesto. Además, se realizaron análisis sensorial y microestructural de los chips deshidratados y fortificados, y la estabilidad de los compuestos durante tres meses de almacenamiento. Finalmente, se estimó la bioaccesibilidad de los compuestos fortificantes adicionados, así como la digestión de almidón *in vitro* y el índice glucémico estimado. En cuanto a los resultados obtenidos, se encontró que las condiciones que optimizaron el proceso de impregnación fueron: presión de vacío 77,3 kPa, tiempo de vacío 3,0 min, tiempo de restauración 4,0 min; mientras que las condiciones que optimizaron el proceso de microondas al vacío fueron: presión absoluta de 4,0 kPa y densidad de potencia de 1,7 W·g<sup>-1</sup>. Los compuestos fortificantes se mostraron estables durante el tiempo evaluado y las diferencias fueron atribuidas a diferencias en el proceso de impregnación. Finalmente, la bioaccesibilidad de los compuestos fortificantes fue de: 58,3; 14,0 y 15,8 % para el calcio, la vitamina C y la vitamina E, respectivamente y el índice glucémico estimado de ~72. Se concluye que la fortificación mediante la técnica de impregnación al vacío junto con el proceso de deshidratación por microondas al vacío, son una alternativa para producir snack bajo en grasa con valor agregado y aceptable calidad sensorial.

**Palabras claves:** Impregnación al vacío, *Solanum tuberosum*, chips de papa, fortificación, producto deshidratado.

## ABSTRACT

Potato snacks can be used as an ideal strategy for nutrient delivery, since they are one of the most widely consumed products in the world. Due to fried snacks are known to be a significant source of fat intake, consumption is changing towards healthier alternatives. The aim of this research was to evaluate the effect of vacuum impregnation and three dehydration techniques: Heated Air Drying, Freeze Drying, and Microwave Vacuum Drying of the potato snack that has been fortified with Active Components: calcium and vitamins C and E, using a national cultivar (Diacol Capiro). Vacuum Impregnation and Microwave Vacuum Drying were evaluated using the response surface methodology that had a Central Composite experimental design. In addition, sensorial and microstructural analysis and the stability of added compounds during three months of storage were carried out. Finally, the bioaccessibility of the added fortifying compounds was estimated as well as the *in vitro* starch digestion and the estimated glycemic index. Regarding the results, the optimal conditions of vacuum impregnation process were: vacuum pressure 77,3 kPa, time at vacuum stage 3,0 min, time at atmospheric stage 4,0 min; whilst microwave vacuum drying optimal conditions were absolute pressure of 4,0 kPa and power density of 1,7 W·g<sup>-1</sup>. The fortifying compounds remained stables during the evaluated time and the differences were attributed to the vacuum impregnation process. Finally, the bioaccessibility of fortifying compounds was 58,3; 14,0 y 15,8 % to calcium, vitamin C and vitamin E, respectively, and the estimated glycemic index was ~72. It is concluded that fortification through vacuum impregnation process along to microwave vacuum drying are an alternative to produce low fat potato chips with added value and acceptable sensory quality.

**Keywords:** Vacuum Impregnation, *Solanum tuberosum*, potato chips, fortification, dehydrated product.

## 1. INTRODUCCIÓN

La papa es un tubérculo perteneciente a la familia de las Solanáceas (Tadesse, Atlabachew, & Mekonnen, 2015). Es el cuarto cultivo alimentario más importante del mundo, después del maíz, el trigo, y el arroz (FAO, 2017; Kotíková et al., 2016). Sin embargo, algunas fuentes lo sitúan en el tercer lugar para la alimentación humana, después del trigo y el arroz (FEDEPAPA & FNFP, 2018; Tamasi et al., 2015). Además, el ritmo de expansión en el cultivo mundial de papa, supera con creces el de los cultivos mejor clasificados (Birch et al., 2012; Bradshaw et al., 2007; FAO, 2008a; Singh & Kaur, 2016). En ese sentido, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, del inglés *Food and Agriculture Organization of the United Nations*), la producción mundial de papa en 2017 superó los 380 millones de toneladas, alcanzando una producción total de 388 190 674 toneladas (FAO, 2017). En cuanto a su composición nutricional, contiene aproximadamente 80 % de agua y 20 % de materia seca, alrededor de la cual el 60-80 % es almidón (Singh & Kaur, 2016), por lo que representa una fuente importante de energía.

A nivel de Latinoamérica, los principales países productores de papa son Perú y Brasil con 4 776 294 y 3 656 846 toneladas, respectivamente; Colombia ocupa el tercer lugar en importancia en la producción de papa, alcanzando 2 819 026 toneladas para el año 2017, con un rendimiento de 19 toneladas por hectárea (FAO, 2017). Los principales departamentos productores de papa son Cundinamarca, Boyacá, Nariño, Antioquia y Santander (Agronet, 2017).

Según datos aportados por la Federación Colombiana de Papa (FEDEPAPA), alrededor de 110 mil familias se encuentran ligadas a la explotación directa de este cultivo y del total de papa producida en el país, aproximadamente el 8 % va dirigido a la industria y el 92 % restante de la producción se queda en el sector primario que contiene la papa fresca y la papa para siembra, de los cuales el 10 % corresponde a autoconsumo, el 64 % se dirige a las centrales mayoristas y el remanente es papa para semilla (Suárez, 2012). Por lo tanto, el eslabón secundario y terciario de la cadena de la papa en Colombia, relacionados con el

tratamiento para el consumo y la transformación de la papa a nivel industrial, respectivamente, se encuentran menos extendidos (Espinal et al., 2005; Suárez, 2012).

Sin embargo, a nivel mundial más del 50 % de la producción, se procesa para obtener ingredientes y productos alimentarios, tales como harina y almidón, entre otros (Hernández, 2014; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2008) y en las aplicaciones alimentarias se destacan: la papa congelada, las hojuelas de papa frita y la papa deshidratada en gránulos o harina (Chen, Singh, & Archer, 2018; Dyer, Daizell, & Olegario, 2005). Dentro de las alternativas para la industrialización de la papa, se encuentran los procesos de deshidratación, liofilización y microondas (Huang et al., 2011), que gracias a su versatilidad, permiten obtener diferentes productos con características de calidad propias. Al mismo tiempo, actualmente existen diversas tecnologías para generar valor agregado en los alimentos dentro de las que se encuentra la fortificación.

La fortificación, se define como la adición deliberada de uno o más nutrientes a un alimento, si está o no contenido normalmente, con el propósito de prevenir o reducir el riesgo de que ocurra una carencia, así como la contribución a la corrección de una deficiencia (Codex Alimentarius, 1991; Ministerio de Salud y Protección Social, 2015). Existen diferentes técnicas para la fortificación de alimentos, una de ellas es la impregnación al vacío (IV), que aprovecha la microestructura de las matrices alimentarias, para incorporar compuestos como vitaminas, minerales, antioxidantes, antimicrobianos, fibra dietaria y probióticos en su interior (Derossi, De Pilli, & Severini, 2012). Diversos autores han reportado esta técnica para la incorporación de compuestos en la matriz de la papa (Erihemu, Hironaka, et al., 2015; Erihemu, Kazunori Hironaka, et al., 2015; Hernández et al., 2014; Hironaka et al., 2011). Aprovechando que es un producto de amplia producción y consumo, es un buen vehículo para incorporar compuestos de interés en la alimentación humana, pudiendo aumentar la ingesta de micronutrientes o sustancias bioactivas.

Finalmente, en los productos fortificados es importante hacer una estimación de la cantidad de compuestos que podrían estar realmente disponibles para la absorción en el organismo, por lo que el presente estudio abarcó desde la fortificación de las rodajas de papa,

su proceso de estabilización mediante deshidratación por microondas al vacío hasta un análisis de digestión *in vitro* de almidón, incluyendo un estimativo de la bioaccesibilidad de compuestos fortificantes.

### **1.1 Planteamiento del Problema**

En Colombia, la papa ocupa el segundo lugar en importancia como producto alimenticio por lo que tiene un lugar importante en la canasta familiar y está presente en todas las escalas sociales (FEDEPAPA & FNFP, 2018; Superintendencia de Industria y Comercio, 2009); sin embargo, es un cultivo de carácter transitorio del que se obtienen dos cosechas al año y las épocas de siembra están determinadas por las condiciones climáticas, especialmente lluvias y ocurrencia de heladas (Espinal et al., 2005; FEDEPAPA, 2015). Esto conlleva a la generación de temporadas en las que se concentra la producción y la oferta del tubérculo, lo cual tiene por consecuencia uno de los principales problemas del mercado, la concentración de la oferta, afectando el precio estimado de venta generando como resultado pérdidas de producto y económicas, adicional que la forma de almacenamiento de la papa se hace en fresco, dificultando su transporte y la convierte en un producto altamente perecedero (FEDEPAPA, 2014, 2015; FEDEPAPA & Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004), siendo evidente la falta de un valor agregado en la cadena de la papa.

Las pérdidas anuales de papa a nivel de poscosecha fluctúan entre el 10 y 15 %, los cuales corresponden entre 281 mil a 422 mil toneladas por año, siendo la brotación prematura uno de los factores más limitantes (Barona, Mateus-Rodríguez, & Montesdeoca, 2012; Rodríguez & Moreno, 2010); más el consecuente inconveniente de manejo de residuos. Por otro lado, las papas frescas almacenadas están expuestas a otros riesgos potenciales, como excesiva pérdida de peso y deterioro por microorganismos; e incluso bajo buenas condiciones de almacenamiento, puede dar como resultado la disminución de su calidad en el uso final (E. Kim & Kim, 2015), lo cual es un problema para un posterior aprovechamiento tanto a nivel comercial como industrial.

Actualmente en Colombia no existe una cadena de valor que potencie la transformación industrial de la papa y que aproveche su alto valor nutritivo y energético, siendo necesario evaluar alternativas de procesamiento que deriven en la obtención de nuevos productos a partir de la oferta de papa existente en el país. Una de estas alternativas son los productos deshidratados que parecen poseer un gran potencial para aumentar la cuota de mercado de los productos procesados de papa, debido a su disponibilidad, conveniencia, bajo costo, versatilidad y estabilidad, además de facilitar el almacenamiento del producto final con respecto al producto fresco y disminuir las pérdidas poscosecha (FAO, 2008a; E. Kim & Kim, 2015; Ruhanian & Movagharnejad, 2015).

Teniendo en cuenta que las nuevas tendencias de la población en cuanto a formas de alimentación, se dirigen hacia productos alimenticios prácticos, libres o bajos en grasa, y aprovechando el alto mercado que posee la papa en forma de snacks y su amplia participación en todos los sectores sociales del país y del mundo; es importante evaluar procesos alternativos que permitan ofertar productos con características sensoriales aceptables y de calidad superior a los ofrecidos por los métodos tradicionales. En este sentido y para lograr lo anterior, se pueden usar diversos procesos tecnológicos como estrategia que permita dar un valor agregado a la papa; dentro de los mismos están la deshidratación y fortificación de alimentos.

Con la presente propuesta, se pretende desarrollar una nueva alternativa de procesamiento para la papa, a través de la aplicación de la impregnación al vacío y la deshidratación, además de evaluar algunas propiedades tecnológicas y nutricionales, permitiendo aumentar la cadena de valor de este cultivo al ofrecer nuevas alternativas para el desarrollo industrial de este producto.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Desarrollar una nueva alternativa de procesamiento para la papa (variedad Diacol Capiro) basado en la impregnación al vacío y la deshidratación, para la obtención de un producto fortificado y deshidratado.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Objetivo específico N° 1

Determinar algunas características fisicoquímicas y térmicas de la papa variedad Diacol Capiro.

- Objetivo específico N° 2

Determinar las mejores condiciones del proceso de fortificación de la papa, mediante la técnica de impregnación al vacío y su aplicación combinada con algunas técnicas de deshidratación.

- Objetivo específico N° 3

Determinar las mejores condiciones de un proceso de secado que garanticen la obtención de un producto fortificado con características sensoriales y texturales propias del mismo.

- Objetivo específico N° 4

Evaluar la estabilidad de los compuestos adicionados durante el almacenamiento y la digestibilidad *in vitro* del almidón.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades del cultivo de papa

La planta de papa, es una herbácea perteneciente a la familia de las Solanáceas, que crece hasta 100 cm de altura, tiene flores blancas y moradas con estambres amarillos y algunos cultivares producen pequeños frutos cada uno de los cuales contiene hasta 300 semillas (figura 1) (Luis et al., 2011; Singh & Kaur, 2016; Srivastava, Bhardwaj, & Singh, 2016; Tadesse et al., 2015). A medida que crece la planta, sus hojas compuestas fabrican almidón que es transferido a las terminaciones de sus tallos subterráneos (o estolones), estos tallos se van engrosando para formar los tubérculos, cuyo número y tamaño varía y depende generalmente de la humedad y los nutrientes disponibles en el suelo (CIP, 2019).

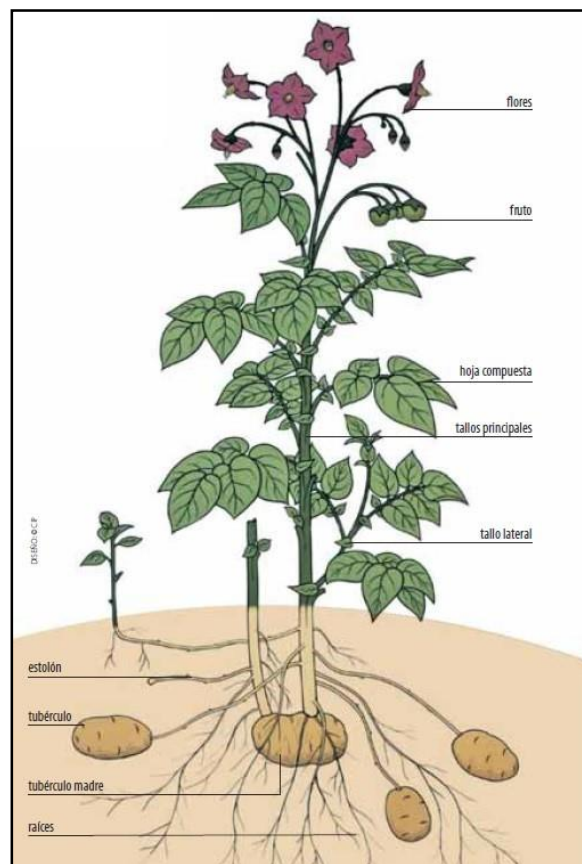
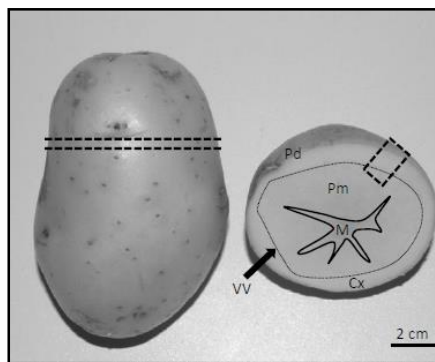


Figura 1. Planta de papa.  
Tomado de FAO, (2008a).



En diversas variedades comerciales de papa, la forma del tubérculo varía y puede ser redondo, ovalado u oblongo. Además, algunos cultivares nativos producen tubérculos de diversas formas irregulares. El color del tubérculo puede variar entre blanco crema, amarillo, naranja, rojo o morado. Algunas variedades presentan dos colores en el mismo tubérculo (Gobernación de Antioquia, 2012). Los tubérculos son los órganos comestibles y es lo que se hará referencia posteriormente como papa. En éstos, se pueden diferenciar la pulpa y el peridermo o piel. La pulpa está principalmente compuesta por parénquima de almacenamiento que contiene los gránulos de almidón (Bradshaw & Gebhardt, 2007; Singh & Kaur, 2016) (figura 2).



*Figura 2. Morfología del tubérculo de papa.*

*Peridermo o piel (Pd). Corteza (Cx) es un tejido presente entre la piel y el anillo vascular (VV). La región perimedular (Pm) está presente en el anillo vascular y está delimitada por la médula (m). Tomado de Singh & Kaur, (2016).*

El cultivo de la papa posee una alta adaptabilidad, se localiza entre 2000 y 4000 metros sobre el nivel del mar, siendo uno de los alimentos básicos en muchos países (Gionfriddo et al., 2012; Gobernación de Antioquia, 2012). Además, hasta un 85 % de la planta es comestible, en comparación con el 50 % en el caso de los cereales (FAO, 2008a). Todo esto, sumado a su alto contenido de energía lo hacen el producto no cereal más consumido a nivel mundial (Singh & Kaur, 2016).

En cuanto a su composición nutricional, las papas contienen aproximadamente 80 % de agua y 20 % de materia seca, alrededor de la cual, el 60-80 % es almidón por lo que representa una fuente importante de energía (Murniece et al., 2011; Singh & Kaur, 2016). Contiene además 2-2,5 % de proteínas, 1-1,8 % de fibra y 0,15 % de ácidos grasos (Gionfriddo et al., 2012; Liu et al., 2009; López-Cobo et al., 2014). Adicionalmente, es buena fuente de vitamina C (10-15 g/100 g); Potasio (421 mg/100 g); Fósforo (56 mg/100 g) y

otros micronutrientes como vitaminas del complejo B y minerales como magnesio, hierro, calcio y zinc (FAO, 2008a; Murniece et al., 2011).

### 2.1.1 Producción de papa en el mundo

La producción mundial de papa en 2017 superó los 380 millones de toneladas, alcanzando una producción total de 388 190 674 toneladas, con un área total cosechada de 19 302 642 hectáreas (ha), y un rendimiento promedio de 20,11 toneladas / ha. Los países que presentaron mayor producción en el año 2017 en toneladas/año fueron: China (99 147 000), India (48 605 000), Rusia (29 589 976), Ucrania (22 208 220) y Estados Unidos (20 017 350). A nivel de continentes, Asia concentra más de la mitad de la producción de papa (50,4 %), mientras que Europa (31,4 %), América (11,4 %), África (6,4 %) y Oceanía (0,4 %), los datos anteriores según la FAOSTAT (FAO, 2017).

En la figura 3, se puede observar el crecimiento en la producción mundial de papa de 1980 hasta 2017 (FAO, 2017). La productividad ha aumentado gracias al mejoramiento de las semillas, de las variedades y de los métodos de manejo de los cultivos. Además, en muchos países, el cambio de las costumbres alimenticias, con un consumo creciente de productos transformados industrialmente, ha generado una demanda mayor (FEDEPAPA, 2014). Dentro de los alimentos procesados de papa, se destacan: la papa congelada, las hojuelas de papa frita (o chips) y, en menor medida, la papa deshidratada (Chen et al., 2018; Singh & Kaur, 2016).

Por otro lado, el elevado rendimiento por hectárea de la papa permite obtener además una producción de energía digestible diaria comparable a los cereales. La papa puede producir entre dos y cuatro veces más alimento que el arroz o el trigo y presenta numerosas propiedades nutritivas (FEDEPAPA, 2014). El cultivo tiene una gran capacidad de adaptación a sistemas agrícolas muy diversos y se pueden cultivar papas a 4300 metros, en una variedad de climas desde las montañas de los Andes hasta las tierras bajas tropicales de Asia y África (FAO, 2008b).

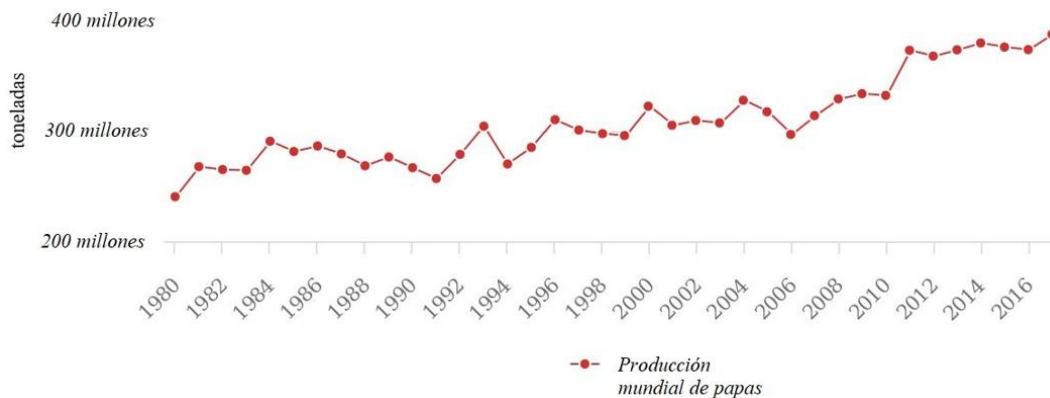


Figura 3. Producción de papa 1980 - 2017.  
Tomado de FAO, (2017).

A pesar de su importancia como alimento básico y en la lucha contra el hambre y la pobreza, la papa se ha descuidado en gran medida en las políticas de desarrollo agrícola para cultivos alimentarios en varios países. Esto puede estar relacionado en parte con la imagen de la papa como comida rápida que contribuye al aumento de los niveles de obesidad. En este sentido, una nueva tendencia importante se relaciona con el mayor esfuerzo de la comunidad mundial de la papa, incluida la industria, para resaltar los múltiples beneficios para la salud de la papa cuando no es frita (Singh & Kaur, 2016).

### 2.1.2 Producción de papa en Colombia

En América del Sur, Colombia ocupa el tercer lugar en importancia en producción de papa con 2 819 026 toneladas, después de Perú (4 776 294 toneladas) y Brasil (3 656 846 toneladas), con un rendimiento promedio de 18,91 toneladas / ha (FAO, 2017).

Según la Federación Colombiana de Productores de Papa (FEDEPAPA), en un área de aproximadamente 160 mil hectáreas en Colombia, existen más de 30 variedades de papa cultivadas (Agronet, 2017; Bash, 2015; Gobernación de Antioquia, 2012; Superintendencia de Industria y Comercio, 2009), pero solo algunas de ellas cuentan con gran importancia comercial: Parda Pastusa, ICA-Puracé, Tuquerreña o Sabanera, Pastusa Suprema, Pastusa Superior, criolla Colombia (*Solanum Phureja*), comercialmente conocida como papa amarilla y la variedad Diacol Capiro también conocida como R12 negra, utilizada como

materia prima por la industria (Bash, 2015; Espinal et al., 2005); mientras que otras variedades como la ICA-Nariño, ICA-Nevada, Esmeralda, Salentina, Argentina, Roja-Nariño, Punto Azul, Rubí, ICA-Cumanday y numerosos materiales nativos representan un porcentaje menor de producción (Gobernación de Antioquia, 2012). Sin embargo, cuatro variedades concentran el 50 % del área sembrada: Superior (20 %), Diacol (13 %), Pastusa (10 %) y criolla (7 %); finalmente, el 93 % de la producción de papa en Colombia se concentra en cinco departamentos: Cundinamarca (40 %), Boyacá (27 %), Nariño (19 %), Antioquia (4 %) y Santander (3 %) (Agronet, 2017; FEDEPAPA and FNFP, 2018) (figura 4).

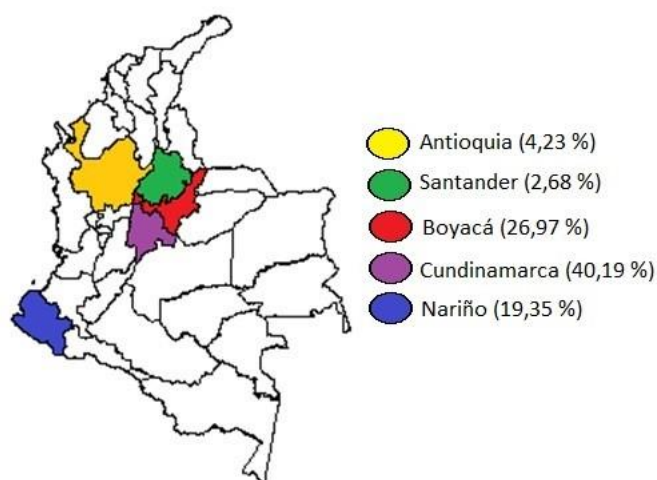


Figura 4. Principales Departamentos productores de papa en Colombia.  
Elaboración propia.

En el Departamento de Antioquia, existen dos zonas de montaña bien diferenciadas con localidades productoras: la Zona del Oriente de la ciudad de Medellín que incluye los municipios de Carmen de Viboral, San Vicente, La Unión, Concepción, con alturas que oscilan entre los 2100 y 2800 m.s.n.m., temperatura media entre 14 a 17 °C y una precipitación pluvial anual entre 1500 y 2000 mm; y la Zona Norte, que comprende los municipios de Santa Rosa de Osos, San Pedro y Entrerriós, con alturas que están entre los 2400 a 2700 m.s.n.m., con temperaturas medias entre 14 a 15 °C y con una precipitación anual entre 2200 y 2500 mm (FEDEPAPA & Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004). En Antioquia y de acuerdo a FEDEPAPA cerca del 90 % del área total cultivada es variedad Diacol Capiro, mientras que 8 % corresponde a papa criolla variedad

Colombia, 1 % ICA Nevada y 1 % ICA Puracé (FEDEPAPA and FNFP, 2018; Gobernación de Antioquia, 2012).

La planta de papa variedad Diacol Capiro (figura 5), es una planta de porte bajo, presenta tallos de poco grosor color verde y púrpura, flores color morado oscuro, predominan los tubérculos grandes y con forma redonda ligeramente aplanada, con piel color morado, ojos superficiales y pulpa crema (Gobernación de Antioquia, 2012).



*Figura 5. Papa variedad Diacol Capiro.  
Tomada de Gobernación de Antioquia, (2012).*

## **2.2 Fortificación de Alimentos**

El Codex Alimentarius, define la fortificación o enriquecimiento como la adición de uno o más nutrientes esenciales a un alimento, tanto si está como si no está contenido normalmente en el alimento, con el fin de prevenir o corregir una deficiencia demostrada de uno o más nutrientes en la población o en un grupo específico de la población (Codex Alimentarius, 1991; OMS & FAO, 2017). Varias estrategias se han utilizado para tratar las deficiencias de micronutrientes a nivel mundial, algunas de ellas son: el suministro de suplementos alimenticios, la fortificación de alimentos procesados, la biofortificación de cultivos con fertilizantes ricos en minerales y la implementación de programas de

mejoramiento e ingeniería genética, para generar variedades ricas en minerales de los cultivos básicos o de primera necesidad (Botero, 2008; Gómez-Galera et al., 2010).

### 2.2.1 Impregnación al vacío en alimentos porosos

La técnica de impregnación al vacío (IV) es usada para la fortificación de alimentos, ya que tiene la capacidad de incorporar compuestos fisiológicamente activos (CFA), como vitaminas, minerales, antioxidantes, o compuestos de interés como depresores de actividad acuosa, reguladores de pH, antimicrobianos, fibra dietaria, probióticos, prebióticos y simbióticos, aprovechando la microestructura porosa de las matrices de los alimentos, para reemplazar el gas ocluido en su estructura celular y/o líquido nativo presente, por solutos contenidos en un líquido de impregnación (Derossi et al., 2012; Radziejewska-Kubzdela & Kido, 2014). Esta tecnología ha sido ampliamente utilizada como pretratamiento en procesos de secado y en la prevención de pardeamiento oxidativo por remoción de oxígeno desde los poros, mejorando las características sensoriales y nutricionales de los alimentos (Ostos, Díaz, & Suárez, 2012).

El proceso de IV fue descrito por Fito & Pastor, (1994); Fito, (1994), a través del mecanismo hidrodinámico (HDM, del inglés *Hydrodynamic Mechanism*), como un proceso de transporte de materia en un sistema sólido poroso-líquido. Según este mecanismo, al sumergir un alimento en una disolución de impregnación a una determinada presión de vacío durante un tiempo determinado (etapa de vacío) y restaurar posteriormente la presión atmosférica (etapa de restauración), los gradientes de presión creados en el sistema provocan el flujo de la disolución externa hacia el interior de la estructura del alimento. La cantidad de líquido que impregne la estructura dependerá de las características del alimento, de las propiedades de la disolución de impregnación y de las condiciones específicas del proceso que experimente la matriz durante todo el proceso IV (Botero, 2008), esto es, la etapa de vacío y la etapa a presión atmosférica.

Este mecanismo se puede visualizar en la figura 6, considerando un poro ideal de geometría cilíndrica, ilustrado en la situación A. En la situación B, se describe el contacto de

las fases presentes independientes; al entrar en contacto el sólido poroso con el medio líquido, se produce el ingreso de líquido exterior en el poro por capilaridad debido a la tensión superficial del líquido, dependiendo del diámetro del poro. En la situación C, la aplicación de vacío promueve la expansión del gas en el sistema, acompañado de la salida de parte del mismo de los poros, arrastrando o no líquido nativo presente en los mismos. Posteriormente, cuando se alcanza el equilibrio de presiones se produce la entrada capilar de líquido en los poros (situación D). Finalmente, al restablecer la presión atmosférica en el sistema, se produce la entrada de líquido externo y compresión del gas residual (situación E) (Botero, 2008; Casim, 2011; Fito et al., 1996; Vásquez, 2011).

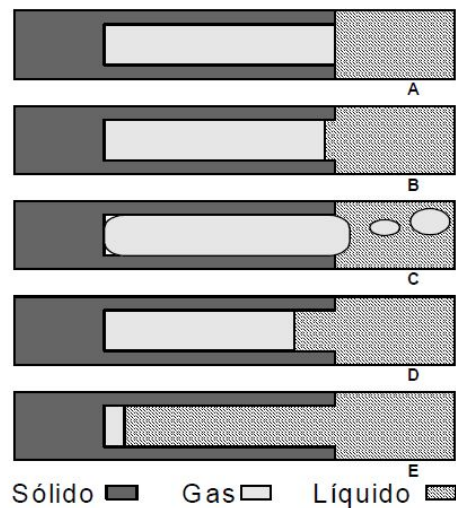


Figura 6. Mecanismo de IV en un poro ideal.  
Tomado de Botero, (2008).

Por lo tanto, el mecanismo hidrodinámico (HDM) está acompañado con fenómenos de deformación-relajación (DRP, del inglés *Deformation-Relaxation Phenomena*) en la matriz sólida del sistema, debido a las propiedades viscoelásticas de la matriz. Este acoplamiento HDM-DRP en la matriz del producto influye en el nivel de impregnación del líquido y en las propiedades del producto luego del tratamiento (Casim, 2011; Fito, Chiralt, Barat, Andrés, et al., 2001), reflejando cambios en el volumen del producto al final de las etapas a vacío y a presión atmosférica.

El acoplamiento HDM-DRP ha sido modelado por Fito et al., (1996). Este modelo establece la relación entre la fracción volumétrica de líquido incorporado a través del

mecanismo hidrodinámico (X), las deformaciones volumétricas de la estructura al final de la etapa a vacío y al final del proceso ( $Y_1$  y  $Y$ , respectivamente), la porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ) del producto (porosidad disponible al proceso IV) y la relación de compresión  $r$  (radio entre la presión de vacío y la presión atmosférica). La ecuación 1 describe esta relación:

$$X - Y = (\epsilon_e + Y) \left(1 - \frac{1}{r}\right) - Y_1 \quad (1)$$

La relación HDM-DRP y por tanto el grado de impregnación está afectada por diversos factores combinados, relacionados con parámetros del proceso (presión y tiempo), características de la matriz (tamaño y forma de la muestra, composición y estructura, tamaño y distribución de poros, tiempo de relajación) y características del líquido de impregnación (densidad y viscosidad de la solución) (Cortés, Chiralt, & Puente, 2005).

Debido a que en el proceso de IV actúa el mecanismo HDM, la ventaja que posee el método, frente al mecanismo de impregnación netamente atmosférico, radica en que se optimiza el uso de la superficie interior de los poros como área de intercambio sólido-líquido, lo cual acelera los intercambios osmóticos a través de las paredes celulares en el interior del producto, y permite, por ende, un mayor nivel de impregnación en tiempos mucho menores (Casim, 2011).

La posibilidad de incluir en la estructura de un alimento poroso componentes de interés hace de la impregnación a vacío una técnica eficaz para el diseño de nuevos productos nutricionalmente equilibrados, saludables y/o funcionales (Betalleluz, 2015; Fito et al., 2001). Como no se requiere de la utilización de altas temperaturas se minimiza el daño a los tejidos y se preserva el color, el sabor, el aroma y componentes activos naturales (Radziejewska-Kubzdela & Kido, 2014). Según Cortés et al., (2005), esta técnica puede incrementar la oferta de vegetales en el mercado, con características diferenciales como valor agregado, presentándose como una alternativa de aplicación en la industria alimentaria, para la producción de nuevos alimentos por las siguientes ventajas: cinéticas de transferencia de masa rápidas, mayor ganancia de solutos en tiempos cortos, mejor conservación del color y mejora del mismo en algunos productos, conservación de sabor y aroma del producto fresco,



sin incrementos importantes de tiempo de proceso. En ese sentido, la impregnación al vacío puede ser considerada como una herramienta en el desarrollo de productos vegetales o frutícolas sin destruir su estructura celular mientras convenientemente se modifica su composición original (Montero, 2007).

En general la IV, se ha aplicado a diferentes matrices para la incorporación de calcio tales como berenjena, zanahoria, champiñones (Gras et al., 2003), mango (Ostos et al., 2012; Rodríguez, Guardiola, & Pacheco, 2008) piña (Tiwari et al., 2018); zucchini (Occhino et al., 2011) y lechuga (Vásquez, 2011). Se reporta además la impregnación de fresa con vitamina E (Restrepo, Cortes et al., 2009); pera con compuestos antipardeantes (Chafer et al., 2011); uchuva con calcio y vitaminas C y E (Botero, 2008); hongos comestibles con calcio, zinc y vitaminas C y E (Ruíz, 2009); cáscaras de naranja con potasio, sodio y vitaminas B<sub>1</sub>, B<sub>6</sub> y B<sub>9</sub> (Restrepo et al., 2012); uchuva con extractos de plantas con actividad antimicrobiana y antioxidante (Ciro, 2012); plátano con soluciones antioxidantes (René et al., 2016); apio con vitamina E (Martelo, Cortés, & Suárez, 2010); endibia, brócoli, coliflor y zanahoria con aloe vera (Sanzana, 2010).

Una de las matrices alimentarias más usadas para el proceso de IV, es la manzana debido a sus altos valores de porosidad efectiva (~25 %) (Casim, 2011), en ese sentido la manzana se ha usado para impregnar: vitamina E (Cortés, Osorio, & García, 2007); miel (Montero, 2007); betacaroteno (Santacruz-Vázquez et al., 2008); zumo de arándanos (Castagnini, 2015); zumo de mandarina (Betoret, Sentandreu, & Betoret, 2017); prebióticos, probióticos y antioxidantes (Betalleluz, 2015) y finalmente derivados de quercetina (Schulze, Hubbermann, & Schwarz, 2014), entre otros. Todos los estudios anteriormente citados muestran que la IV es una técnica apropiada en desarrollo de alimentos con valor agregado.

### 2.2.2 Aplicaciones de la Impregnación al vacío en papa

La IV ha sido ampliamente usada para incorporar varios solutos dentro de la estructura interna de matrices porosas como frutas y vegetales, ya que tienen una gran

cantidad de espacios intercelulares que ofrecen la posibilidad de ser impregnados con una solución externa (Fito, Chiralt, Barat, Andrés, et al., 2001).

En el caso específico de la papa, diversos autores han aplicado la técnica de IV obteniendo buenos resultados, a saber: Hironaka et al., (2011), fortificaron diferentes variedades de papa (Irish Cobbler y Toyoshiro) con un 10 % de ácido ascórbico, evaluando posteriormente los efectos de la cocción al vapor y el almacenamiento hasta 14 días. Los resultados mostraron que luego de la impregnación se logró aumentar el contenido de ácido ascórbico diez veces ( $150 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ bh}$ ) y que luego de la cocción y el almacenamiento durante 14 días conservaron relativamente alta cantidad ( $50 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ bh}$ ). Erihemu et al., (2015), fortificaron papas enteras (variedades Toyoshiro y Snowden), con hierro, utilizando pirofosfato férrico al 0,4 % y encontraron que luego de la impregnación, ambas variedades presentaron 6,4 y 6,6 veces más contenido de hierro, alcanzando valores de  $4,1 \text{ mg}$  y  $4,4 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ bh}$ , respectivamente.

Por su parte Hernández, (2014), buscó incorporar diferentes emulsiones de impregnación que contenían compuestos antipardeantes: vitamina E, vitamina C y diferentes porcentajes de ácido cítrico, en láminas de papa (variedad Diacol Capiro), además de evaluar la influencia de estos compuestos sobre el color de la papa durante un período de almacenamiento; encontrando que la luminosidad ( $L^*$ ) fue el parámetro de color más significativo, observándose un efecto blanqueador en la mayoría de los tratamientos. Kazunori Hironaka & Koaze, (2015), fortificaron papas enteras variedades Toyoshiro y Snowden con zinc utilizando una solución de gluconato de zinc 9 %; luego de la impregnación, la variedad Toyoshiro alcanzó  $17,3 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ bh}$  (61 veces más que el control), mientras que la variedad Snowden logro una incorporación de zinc de  $16,7 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ bh}$  (45 veces más que el control).

Otros estudios donde se aplica la IV a la papa, lo reportan Joshi et al., (2016), que utilizaron diferentes porcentajes de calcio y zinc para fortificar rodajas de papa y posteriormente las deshidrataron por medio de microondas. En general los autores encontraron que fue posible incrementar el contenido de calcio en los chips de papa

deshidratados desde 93,3 hasta 727,18 mg ·100 g<sup>-1</sup> y el contenido de zinc desde 1,68 hasta 256,78 mg ·100 g<sup>-1</sup> en comparación con papas fritas comerciales. Moreira & Almohaimeed, (2018) impregnaron chips de papa con compuestos fenólicos provenientes de la remolacha roja y posteriormente sometieron la papa a fritura, encontrando que el contenido fenólico total de los chips aumentó, respecto a la papa sin impregnar. Tiwari et al., (2018), produjeron chips de papa fortificada con calcio, encontrando que el producto desarrollado tuvo 4,5 y 7,1 veces más contenido de calcio que el control y una muestra comercial, respectivamente. Adicionalmente, los atributos sensoriales mostraron que los chips de papa fortificados fueron aceptables hasta 60 días de almacenamiento en condiciones ambientales.

Finalmente, Luo et al., (2019) utilizaron aceite esencial de romero con concentraciones de 4, 8 y 12 %, para obtener un producto innovador de papa mínimamente procesada, y evaluaron su influencia en las propiedades durante el almacenamiento y la posterior fritura. Los resultados mostraron que la carga microbiana de las muestras fue reducida por la mayor concentración de aceite de romero, mostrando su potencial como antimicrobiano; sin embargo, el color se vio adversamente afectado de manera proporcional al contenido de aceite, debido probablemente a la oxidación.

### **2.3 Compuestos Fisiológicamente Activos**

Los compuestos fisiológicamente o biológicamente activos (CFA) son compuestos químicos esenciales y no esenciales (por ejemplo, vitaminas o polifenoles) que cumplen funciones en el cuerpo que pueden promover la buena salud o reducir un riesgo de enfermedad (Barragán, 2011; Biesalski et al., 2009).

#### **2.3.1 Calcio**

El calcio es un mineral esencial en el cuerpo humano, necesario para el normal crecimiento y desarrollo del esqueleto, los dientes, los nervios y los músculos, así como para regular diversos procesos metabólicos (Barrera Puigdollers, 2007). Es el nutriente inorgánico más abundante en el ser humano y llega a representar hasta el 2 % del peso

corporal. El calcio tiene una enorme influencia funcional ya que interviene en un gran número de transformaciones y mecanismos, como son la coagulación de la sangre, la contracción muscular, la activación enzimática, la transmisión de impulsos nerviosos, entre otros (Badui, 2006). Este mineral se encuentra principalmente en la leche y sus derivados (fundamentalmente quesos y yogures), así como en diversos vegetales (brócoli, col y legumbres), pescado (fundamentalmente la sardina y el salmón), cereales integrales y frutos secos (Barrera Puigdollers, 2007; Gras et al., 2003).

Por otro lado y de acuerdo al Ministerio de la Protección Social, los valores diarios de referencia (VDR) de nutrientes para el calcio en niños entre 6 meses y 4 años es de 385 mg, en tanto que para niños mayores de 4 años y adultos es de 1000 mg (Ministerio de la Protección Social, 2011). Con respecto a la deficiencia de consumo de calcio en Colombia, la Encuesta Nacional de Situación Nutricional (ENSIN) realizada en el 2010 mostró que el 85,8 % de los colombianos no cubre los requerimientos diarios de calcio (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2008, 2010). Según el perfil alimentario y nutricional realizado en 2019, esta cifra se mantiene, ya que la prevalencia del riesgo de deficiencia en Antioquia se encontró en un 85 % (Gerencia de Seguridad Alimentaria y Nutricional, Escuela de Nutrición y Dietética de la Universidad de Antioquia, & Gobernación de Antioquia, 2019; Gobernación de Antioquia, Maná, & Antioquia, 2019).

Para su aplicación en alimentos, comercialmente el calcio se puede encontrar en forma de diferentes sales, tales como el cloruro, lactato, gluconato y fumarato de calcio (Ostos et al., 2012). Con respecto a la incorporación de calcio en alimentos se tienen diversos estudios; Wang, Zhang, & Mujumdar, (2010) usaron el calcio como mejorador de firmeza en frutas y verduras tratadas térmicamente, mejorando la calidad del producto final. Algunos alimentos que han sido enriquecidos con calcio mediante la técnica de impregnación al vacío son: berenjena, zanahoria y champiñones (Gras et al., 2003), mango (Ostos et al., 2012), duraznos (Landaeta et al., 2008) entre otros.

### 2.3.2 Vitamina E

La vitamina E pertenece al grupo de vitaminas liposolubles y es ampliamente utilizada como antioxidante en la industria de alimentos (Restrepo, Cortes et al., 2009). Con este nombre se conocen ocho compuestos de la familia de los tocoferoles y de los tocotrienoles, siendo el más activo el  $\alpha$ -tocoferol. La función de la vitamina E es la de proteger el ADN, proteínas y lípidos del daño oxidativo en el cuerpo humano (Bartosz, 2014); es el mejor antioxidante liposoluble *in vivo* para interceptar los radicales libres y prevenir la destrucción lipídica (Litwack, 2007). En ese sentido, y dado que el cuerpo humano no puede generar su propia vitamina E, se hace necesario consumirla con los alimentos y suplementos que la proporcionen. Como fuentes de vitamina E, se encuentran los aceites vegetales (de soja, maíz, de semilla de algodón y de cárcamo), además de los productos derivados de estos aceites, como margarinas y mayonesas (Gil, 2010).

En general se ha demostrado que el consumo de vitamina E, está relacionado con la reducción de enfermedades cardiovasculares, prevención de cáncer y mejoramiento del sistema inmune (Eitenmiller & Lee, 2004; Litwack, 2007). De acuerdo al Ministerio de la Protección Social, los valores diarios de referencia (VDR) de nutrientes para la vitamina E en niños entre 6 meses y 4 años es de 3,85 mg y de 20 mg para adultos y niños mayores de 4 años (Ministerio de la Protección Social, 2011). En humanos, la deficiencia en vitamina E se relaciona con mayor frecuencia con síndromes de malabsorción de lípidos, que pueden ocurrir con enfermedades genéticas o adquiridas que afectan el intestino, el páncreas o el hígado (Bartosz, 2014). Comercialmente existen derivados de la vitamina E, la cual puede ser adicionada como  $\alpha$ -tocoferol,  $\alpha$ -tocoferol acetato,  $\alpha$ -tocoferol succinato, entre otros (Stinco et al., 2019), siendo el acetato de tocoferol el análogo más usado en suplementos alimenticios y productos cosméticos (Blé-Castillo, Díaz-Zagoya, & Méndez, 2008).

Algunos alimentos que han sido fortificados con vitamina E usando la metodología de IV son: manzana (Cortés, 2004; Park et al., 2005), fresa (Restrepo, Cortes, 2009), uchuva (Restrepo, Cortés Rodríguez, & Márquez, 2009), entre otros.

### 2.3.3 Vitamina C

La vitamina C es una vitamina hidrosoluble con un alto poder reductor. Actúa como cofactor de numerosas enzimas implicadas en la biosíntesis de colágeno, carnitina y algunos neurotransmisores y puede atrapar una gran variedad de especies reactivas del oxígeno (Gil, 2010). La vitamina C se considera esencial ya que no puede ser sintetizada por los seres humanos; se distribuye ampliamente en la naturaleza, en general todas las frutas y verduras la contienen en mayor o menor cantidad y es escaso su contenido en los cereales. Las frutas con mayor contenido son las ácidas, ya que el pH ácido estabiliza a la vitamina C (kiwi, fresa, mango, naranja), y se encuentra también en la papa, la guayaba y el brócoli (Badui, 2006; Gil, 2010).

La deficiencia de vitamina C en la dieta, provoca el escorbuto, enfermedad que vuelve al individuo muy susceptible a contraer diversas infecciones (Botero, 2008). De acuerdo al Ministerio de la Protección Social, los valores diarios de referencia (VDR) de nutrientes para la vitamina C en niños entre 6 meses y 4 años es de 32 mg; y en niños mayores de 4 años y adultos es de 60 mg (Ministerio de la Protección Social, 2011). Con respecto a la deficiencia de consumo de vitamina C en Colombia, la Encuesta Nacional de Situación Nutricional (ENSIN) realizada en el 2005 mostró que la región central del país presentó la mayor prevalencia de deficiencia en la ingesta de vitamina C con casi 30 %, en la que uno de los departamentos más afectados fue Antioquia. Según el perfil alimentario y nutricional realizado en 2019, esta cifra se mantiene, ya que la prevalencia del riesgo de deficiencia en Antioquia se encontró en un 37 % (Gerencia de Seguridad Alimentaria y Nutricional; et al., 2019; Gobernación de Antioquia et al., 2019). Comercialmente, además del ácido ascórbico, existen los L-ascorbatos de sodio, potasio y calcio, así como el palmitato de L-ascorbilo, los cuales se pueden agregar a las matrices alimentarias como nutrimento, antioxidante y conservante (Badui, 2006). Algunos alimentos que reporta la literatura, y que han sido impregnados con vitamina C mediante la técnica de IV son: la papa (Hernández et al., 2014), pera (Chafer et al., 2011) y la uchuva (Botero, 2008), entre otros.

## 2.4 Secado de alimentos

El secado o deshidratación es uno de los métodos más antiguos usado para la conservación de los alimentos (Barbosa-Cánovas et al., 1997). La deshidratación, en cualquiera de sus métodos, disminuye la actividad acuosa de los alimentos, combinando métodos de transferencia de calor y masa y evitando reacciones indeseables por acción enzimática o microbiana (Pedreschi & Kaur, 2009; Ruhanian & Movagharnejad, 2015). Se ha aplicado en diferentes matrices alimentarias tales como papa (Setiady, Rasco, et al., 2009), papa dulce (Joykumar Singh & Pandey, 2012), mango (Link, Tribuzi, & Laurindo, 2018), papaya (Kurozawa et al., 2014), manzana (Kowalski & Pawlowski, 2015), cáscaras de maracuyá (Duarte et al., 2017), entre otras.

Para el caso de la aplicación del proceso de deshidratación en papa, se encuentran diferentes reportes para la obtención de gránulos, copos, hojuelas y la harina (Ezekiel & Singh, 2011; FAO, 2008a; Kakade, Das, & Ali, 2011; E. Kim & Kim, 2015), además los procesos de secado se han usado para la elaboración de puré de papa (Alvarez et al., 2012), sopas instantáneas y chips (E. Kim & Kim, 2015), productos de panadería (Ezekiel & Singh, 2011) y para el desarrollo de aditivos con funciones espesantes y aglutinantes en alimentos (Copeland et al., 2009; Milbourne, Pande, & Bryan, 2007; Yadav et al., 2006). Para la obtención de estos productos deshidratados de papa, se dispone de varias técnicas, cada una de las cuales cuenta con sus propias ventajas y limitaciones (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003; Huang et al., 2011; Singh & Heldman, 2012).

### 2.4.1 Secado convectivo

El secado convectivo o secado por aire caliente (HAD, del inglés *Heated Air Drying*), es el proceso más utilizado para la deshidratación de alimentos, lo cual incluye la papa (Setiady, Rasco, et al., 2009). Consiste en pasar una corriente de aire caliente a través del producto, eliminando el agua de su superficie y creando un gradiente difusional que provoca la salida del agua en forma de vapor desde su interior hacia la corriente de aire (Gowen et al., 2006; Sharma, Mulvaney, & Rizvi, 2003). Sin embargo, los largos tiempos de secado

usualmente necesarios, conducen a cambios físicos y químicos que afectan la calidad del producto deshidratado (Ruhanian & Movagharnjad, 2015), dentro de los que se encuentra la deformación y encogimiento del alimento (Pedreschi & Kaur, 2009).

Diversos estudios muestran diferentes condiciones de procesamiento de secado, variando la temperatura y velocidad de aire (Duarte et al., 2017), además del efecto que tiene la geometría del producto a deshidratar sobre el proceso (Tripathy, 2015). Por otro lado, otros estudios de secado incluyen el desarrollo de modelos matemáticos del proceso de secado (Amjad et al., 2016; Yadav et al., 2006) y tienen en cuenta el efecto de la porosidad y el encogimiento del material durante el proceso y el grado de hidratación, los cuales, son factores importantes para una mejor comprensión del secado; además de relacionar estos fenómenos con los mecanismos de transporte de masa asociados a la difusión del vapor de agua y con los parámetros de calidad de los alimentos.

Algunos de estos trabajos se mencionan a continuación: Aprajeeta, Gopirajah, & Anandharamakrishnan, (2015) evaluaron el encogimiento y el efecto en la porosidad de la papa durante el secado convectivo a 62 °C (7 h, 0,25 m·s<sup>-1</sup>), observando que el encogimiento varía linealmente con respecto al contenido de humedad. Chandramohan & Talukdar, (2014) encontraron diferentes porcentajes de encogimiento para la papa, los cuales variaron entre 74,13 % y 81,56 % con temperaturas de secado de 40, 50, 60 y 70 °C durante 16 h y una velocidad de aire de 2 m·s<sup>-1</sup>. Hassini, Azzouz, Peczalski, & Belghith (2007), determinaron una reducción del volumen de rebanadas de papa, de alrededor del 77 % con respecto al volumen inicial, usando temperaturas de secado de 40, 55, 70 y 85 °C y velocidades de aire de 0,5 y 1 m·s<sup>-1</sup>. Setiady, Tang, et al., (2009) concluyeron que las paredes celulares de la papa tienden a colapsar, durante un proceso de secado convectivo de la papa, lo que se evidenció en un máximo encogimiento y estructura poco porosa. Moon, Pan, & Yoon, (2015) además de estudiar la cinética de secado de papa por aire caliente a 60, 70 y 80 °C, evaluaron la dureza, contenido de antocianinas y color, en papas de pulpa morada y roja, encontrando que con la temperatura más alta usada se produjo un mayor daño en el tejido de la papa y que el contenido de antocianinas disminuyó con el aumento del tiempo de secado.



### 2.4.2 Liofilización

Otro de los métodos de deshidratación es la liofilización (FD, del inglés *Freeze Drying*), que consiste en congelar el producto y posteriormente eliminar el agua como vapor por sublimación bajo condiciones de vacío (Geankoplis, 1998). Una de las ventajas, es que la porosidad de los productos liofilizados, permite una rápida y casi completa rehidratación, por lo tanto es un método muy útil para deshidratar materiales alimenticios en la preparación de alimentos instantáneos (Barbosa-Cánovas et al., 1997). Sin embargo, uno de los mayores inconvenientes, es el alto costo energético y los largos períodos de tiempo de secado (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003).

La liofilización se lleva a cabo a baja temperatura y en consecuencia el daño térmico se minimiza y los nutrientes sensibles al calor, como las vitaminas entre otros, permanecen dentro del producto; permitiendo conservar también algunas características sensoriales (García-Amezquita et al., 2016). Por lo tanto, este proceso ha demostrado ser una alternativa para obtener nuevos ingredientes y productos de calidad superior a los métodos tradicionales (Singh & Heldman, 2012). En general la liofilización se ha usado para diferentes productos tales como papa (Zvitov-Ya'ari & Nussinovitch, 2014), papa dulce (Lin, Tsen, & King, 2005), zanahoria (Voda et al., 2012), pitahaya (Ayala, Serna, & Mosquera, 2010) y diversos tipos de frutas (Marques, Silveira, & Freire, 2006; Shofian et al., 2011).

Para el caso específico de la papa, se han hecho diversos estudios, Setiady, Tang, et al., (2009) liofilizaron unas papas encontrando que el color del producto final se conservó y el porcentaje de encogimiento del mismo fue mínimo. Oikonomopoulou, Krokida, & Karathanos (2011), liofilizaron papas modificando las condiciones de vacío entre 0,06 a 1,50 mbar, encontrando que a menor presión de proceso la porosidad del producto final fue mayor. Por su parte, Wang et al., (2010), al deshidratar rodajas de papa mediante liofilización encontraron que no hubo pérdidas significativas en el contenido de vitamina C, azúcares y almidón. Utilizando este método para la deshidratación de la papa, es posible eliminar el problema del endurecimiento superficial presentado en el secado convectivo y preservar la forma, ya que se produce menos encogimiento del material (Setiady, Tang, et al., 2009).

### 2.4.3 Microondas al vacío

Existen otras técnicas de procesamiento de alimentos que se han desarrollado con el fin de mejorar o reemplazar las tecnologías convencionales, ofreciendo mayor calidad y valor agregado a los productos alimenticios, dentro de las que se encuentra el uso del microondas (Jermann et al., 2015; Knoerzer, 2016). Algunos estudios reportan el uso de estas tecnologías en combinación con los métodos de secado convencionales, dando lugar a periodos de secado más cortos y mayor preservación en la calidad de los alimentos (Cantwell & Karabeyoglu, 2014; Lebovka, Shynkaryk, & Vorobiev, 2007). Este es el caso del secado por microondas al vacío (MVD, del inglés *Microwave Vacuum Drying*).

Las microondas son las ondas del espectro electromagnético con frecuencia entre 300 MHz y 300 GHz (Contreras Monzón, 2006; Singh & Heldman, 2012); cuyo componente eléctrico (que oscila rápidamente con el material alimenticio), permite que la energía del microondas se convierta en energía térmica mediante dos mecanismos: la rotación dipolar y la conducción iónica; tanto los materiales cargados/iónicos como los polares/dipolo se ven afectados por el campo eléctrico de las microondas, los iones se aceleran linealmente en la dirección del campo eléctrico, mientras que los componentes polares giran para alinear su dipolo con el campo eléctrico (Scaman et al., 2014; Singh & Heldman, 2012). La gran ventaja del secado por este método es el calentamiento rápido y volumétrico del alimento, que mejora el transporte de humedad e incrementa la velocidad de secado (Holtz et al., 2010). De esta manera, no se generan elevadas temperaturas en la superficie del alimento, por lo que no tienen lugar sobrecalentamientos, frecuentes en los métodos convencionales (Contreras Monzón, 2006; Shakouri et al., 2014; Yang et al., 2010).

El secado por microondas al vacío (MVD), es un proceso de deshidratación que utiliza la radiación del microondas para generar calor en el rango de presión absoluta (presión de la cámara) por encima del punto triple del agua, pero menor que la presión atmosférica (0,61 – 101,33 kPa) (Scaman et al., 2014). En este proceso de secado, las microondas pueden ser aplicadas de tres formas diferentes:

- Aplicación continua, cuando se utiliza una determinada potencia, independientemente de cualquier parámetro distinto de las condiciones finales del proceso, que podrían ser, tiempo, peso o temperatura.
- Aplicación intermitente o pulsada, en el cual las microondas son introducidas en repeticiones periódicas y la frecuencia de los pulsos puede ser constante o cambiante.
- Aplicación con temperatura controlada, en que el sistema regula la aplicación de las microondas, dependiendo de la temperatura de superficie del producto, en este caso la temperatura es comúnmente medida con sensores de temperatura infrarrojos (Schubert & Regier, 2005).

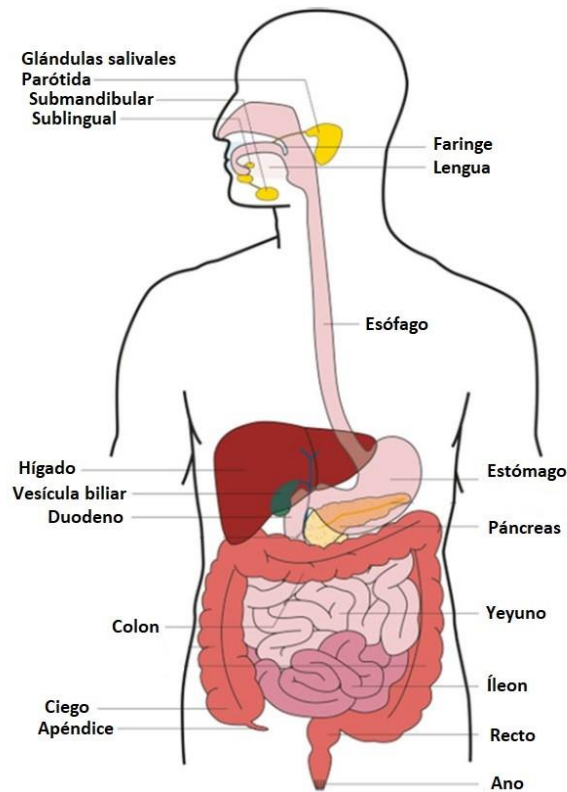
El MVD ha sido utilizado para obtener productos de alta calidad como: zanahorias (Cui, Xu, & Sun, 2004), calabaza (Monteiro et al., 2018), regaliz (Li et al., 2017), ajo (Figiel, 2009), manzanas (Han et al., 2010), cúrcuma (Hirun, Utama-ang, & Roach, 2014), cereales (Patel, Sutar, & Sutar, 2013), ñame (Patel & Sutar, 2016), otros reportes sobre la aplicación de la técnica en diferentes tipos de matrices alimentarias se pueden ver en Bondaruk, Markowski, & Błaszczak, (2007); Huang et al., (2011); Setiady et al., (2007); Richter, (2014).

Para el caso específico de la papa, diversos autores han empleado el MVD para obtener ya sea vegetal deshidratado o snack, buscando determinar condiciones óptimas de operación (Setiady et al., 2007), el efecto en el almacenamiento (Lefort, Durance, & Upadhyaya, 2003) o el efecto del MVD sobre las propiedades como porosidad, color, textura y microestructura de la papa deshidratada (Bondaruk et al., 2007; Setiady, Tang, et al., 2009).

## **2.5 Métodos *in vitro* para estudios de digestibilidad**

El proceso digestivo consiste en una serie de etapas enzimáticas que producen la hidrólisis de los compuestos mayoritarios de los alimentos (grasas, carbohidratos y proteínas) con la consiguiente liberación de numerosos nutrientes (Jadán, 2017), a lo largo del tracto gastrointestinal. El tracto gastrointestinal es un tubo con diferentes compartimentos (figura 7) para cada paso de la digestión; tránsito durante el cual se exponen las diferentes fracciones

del alimento a condiciones variables debido a la secreción gradual de fluidos digestivos y la absorción de agua y nutrientes (Verhoeckx et al., 2015).



*Figura 7. Tracto gastrointestinal.  
Modificado de Verhoeckx et al., (2015)*

De forma simplificada, el proceso de digestión comprende tres fases: oral, gástrica e intestinal. Inicialmente, en la fase oral se lleva a cabo la masticación y mezcla con la saliva que contiene enzimas, con lo que se inicia el proceso de digestión (Tamura et al., 2017). Posteriormente, en la fase gástrica ocurre la transformación del alimento en una masa más fluida, a través de la acción mecánica (contracciones u ondas peristálticas) y la secreción gástrica (conteniendo proteasas, lipasas y ácido clorhídrico); la mezcla se vacía poco a poco en el duodeno (Pérez, 2015; Verhoeckx et al., 2015). Finalmente, en la fase intestinal continúa la digestión de los componentes alimentarios por medio de la bilis (segregada por el hígado) y el jugo pancreático (conteniendo proteasas, amilasas, lipasas) (Pérez, 2015; Verhoeckx et al., 2015).

Debido a que los sistemas *in vivo* requieren de largos tiempos experimentales, son más costosos y representan ciertas limitaciones éticas por el empleo de animales o seres humanos (Paz, 2019), se han extendido el uso de modelos *in vitro* digestivos para evaluar la digestión de alimentos, que tratan de imitar los procesos que ocurren durante la digestión humana (Minekus et al., 2019), teniendo en cuenta varios factores como la concentración de enzimas digestivas, los valores de pH en las fases gástrica e intestinal y el tiempo de digestión, entre otros, mostrando una buena correlación con los resultados obtenidos *in vivo* (Jadán, 2017; Lucas-González, 2018).

Los métodos *in vitro* presentan numerosas ventajas frente a los métodos *in vivo*, dentro de las que se puede destacar: métodos rápidos, de menor costo y de fácil manipulación, posibilidad de toma de muestras en cualquier parte del tracto gastrointestinal simulado y reproducibilidad (Jadán, 2017; Paz, 2019). Sin embargo, los modelos de digestión *in vitro* difieren entre sí en varios parámetros; entre ellos: la composición química de las soluciones digestivas utilizadas en cada fase, las enzimas, sales y tampones utilizados, así como el número y el tipo de etapas comprendidas en la digestión, que pueden incluir las fases oral, gástrica y/o del intestino delgado, y en menor medida, la fermentación intestinal en el colon (Minekus et al., 2019; Paz, 2019; Tamargo et al., 2017; Tamura et al., 2017; Verhoeckx et al., 2015).

Los sistemas *in vitro* se pueden clasificar en dos grandes categorías: estáticos y dinámicos (Jadán, 2017). Los modelos *in vitro* estáticos son los más empleados (89%) debido a su sencillez, disponibilidad y fácil manejo (Jadán, 2017; Paz, 2019). En estos modelos, se simula principalmente las fases de digestión gástrica e intestinal, y en cada fase, el producto alimenticio se incuba por un tiempo específico en condiciones fijas de pH, concentraciones de sales, enzimas y ácidos biliares, y los movimientos peristálticos se emulan con agitación (Jadán, 2017; Paz, 2019). Sin embargo, este método con frecuencia no es una reproducción precisa de las condiciones *in vivo* más complejas, donde el entorno bioquímico está cambiando continuamente y los parámetros físicos del proceso pueden tener un gran impacto en la descomposición de partículas de alimentos más grandes y por lo tanto en la liberación de nutrientes (Paz, 2019). Es por esto que para el diseño de los modelos de digestión dinámica

se ha contemplado además de la geometría del equipo (forma, tamaño y orientación); la continua adición de las secreciones digestivas a los compartimentos del modelo y las complejas fuerzas físicas ejercidas por el tracto gastrointestinal (cizallamiento, molienda y presión ejercida por los movimientos peristálticos) simuladas mediante el uso de rodillos giratorios, discos flexibles o camisas de agua (Guo et al., 2014; Kong & Singh, 2010; Paz, 2019; Verhoeckx et al., 2015).

Los dos sistemas dinámicos más empleados son el Simulador del Ecosistema Intestinal Microbiano (SHIME, del inglés *Simulator of Human Intestinal Microbial Ecosystem*) (figura 8,a) y el Modelo Gastro-Intestinal TNO (TIM, del inglés *TNO Intestinal Model*) (figura 8,b). Estos sistemas además de contemplar los cambios fisiológicos (pH y concentraciones enzimáticas y salinas), realizan la simulación de los movimientos peristálticos (Rocha Barrasa, 2013). El SHIME y el TIM-2 incluyen también una etapa intestinal colónica donde se incorpora la microbiota intestinal (Jadán, 2017). Sin embargo, sólo están disponibles en determinados laboratorios, no es fácil su montaje y mantenimiento, además del elevado coste de la instrumentación y debido a su complejidad, el número de muestras que se pueden evaluar en un corto tiempo es muy reducido (Jadán, 2017; Rocha Barrasa, 2013).

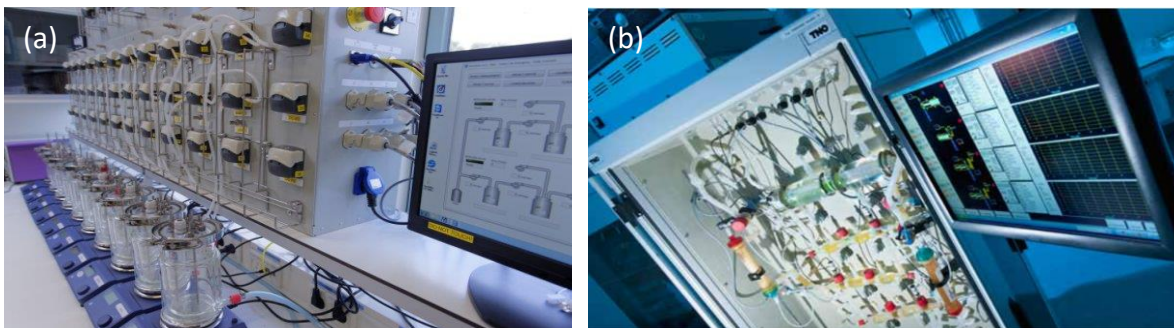


Figura 8. Modelos dinámicos de digestión *in vitro*  
 Simulador del Ecosistema Intestinal Microbiano (SHIME) (a) y Modelo Gastro-Intestinal TNO (TIM) (b).  
 Tomado de Wageningen University & Research on Social Media, (2020); TNO Health Living, (2013).

Otros modelos dinámicos de digestión *in vitro* que se han desarrollado con el fin de simular de una manera más cercana el proceso de digestión, son el Modelo Gástrico Dinámico (DMG, del inglés *Dynamic Gastric Model*); el Simulador Gástrico Humano (HGS,

del inglés *Human Gastric Simulator*) (Modelo Riddet) y el Sistema DIDGI<sup>®</sup>, cada uno de los cuales ha sido validado por las fuerzas físicas ejercidas en el bolo alimenticio (Verhoeckx et al., 2015).

### 2.5.1. Bioaccesibilidad y biodisponibilidad

La evaluación del aporte de un nutriente a través de un alimento al Valor Diario de Referencia recomendado de consumo se lleva a cabo en la mayoría de los casos determinando su contenido en el producto y calculando la ingesta a través de los datos de consumo existentes. Sin embargo, el alimento ingerido está sujeto a una serie de procesos que condicionan la llegada del compuesto de interés a la circulación sistémica (Jadán, 2017).

La efectividad de cualquier nutriente depende de su biodisponibilidad, que significa cuán bien el cuerpo humano lo absorbe y utiliza (Botero, 2008). La biodisponibilidad oral puede ser dividida en tres procesos separados: (1) liberación del compuesto de la matriz durante la digestión en el tracto gastrointestinal (bioaccesibilidad) (2) absorción de la fracción bioaccesible y (3) metabolismo en el intestino y el hígado (Brandon et al., 2014). Por lo tanto, un componente de la biodisponibilidad es la bioaccesibilidad, definida como la cantidad relativa de nutrientes “liberados” de la matriz alimentaria en el tracto gastrointestinal y por lo tanto potencialmente disponibles para la absorción a través de la pared gástrica e intestinal, y su posterior paso a la circulación sistémica, donde ejerce su efecto beneficioso o perjudicial (Jadán, 2017; Mandalari et al., 2013). Sin embargo, el hecho de que un nutriente sea bioaccesible no significa que sea a su vez biodisponible, ya que la biodisponibilidad de un nutriente específico depende de numerosos factores tales como estado de salud, edad, factores nutricionales y alimentarios, las interacciones con otras sustancias (Badui, 2006; Janve & Singhal, 2018). Además, no necesariamente los compuestos más abundantes en los alimentos ingeridos son los que conducen a mayores concentraciones de metabolitos activos en los tejidos. Existen diversos factores que intervienen como la matriz alimentaria y las interacciones con otros compuestos o biomoléculas (Quirós Saucedo et al., 2011).

Por su parte, la bioaccesibilidad de un determinado nutriente se ve afectada por factores como la fuente (variedad), el procesamiento (tratamiento térmico, congelación, enlatado, extracción), el almacenamiento (temperatura, humedad relativa), la preparación (mezcla, cocción), la masticación (física, enzimática) y la digestión (enzimática, química), la microestructura, entre otros (Andrés, 2015; Mandalari et al., 2013; Quirós Saucedo et al., 2011).

Aunque en la estimación de la bioaccesibilidad solo el primer paso del proceso *in vivo* es tenido en cuenta, los métodos *in vitro* son ampliamente usados por su buena correlación con los estudios *in vivo*, además porque son más rápidos, sencillos y de menor coste económico (Martos, 2004).

### 2.5.2. Digestibilidad de almidón

La digestión del almidón, inicia en la boca a través de la amilasa salival, la cual hidroliza el almidón en disacáridos y oligosacáridos pero al llegar al estómago, es inactivada y degradada por las condiciones ácidas que éste presenta, y por lo tanto juega un rol menor en el proceso de digestión del almidón (Singh, Kaur, & Singh, 2013). Posteriormente, al pasar el almidón y sus productos de hidrólisis al intestino delgado, se inicia la actividad de la amilasa pancreática (sintetizada en el páncreas), donde se lleva a cabo la mayoría de la hidrólisis de almidón (Fandila, 2010; Singh et al., 2013). Los productos finales de la hidrólisis son principalmente glucosa, maltosa, maltotriosa y dextrinas; que se hidrolizan aún más por la acción de las enzimas del borde del cepillo del intestino delgado (glucosidasas y sacarasas) (Singh et al., 2013). Como resultado de esta hidrólisis se obtiene glucosa, la cual es absorbida y transportada al torrente sanguíneo (Fandila, 2010).

Debido a que las enzimas presentes en el cuerpo humano son difíciles de extraer o muy costosas, generalmente en los métodos *in vitro*, se usan enzimas extraídas de otros mamíferos o de microorganismos, para simular el proceso digestivo que ocurre en el tracto gastrointestinal de los seres humanos (Singh & Kaur, 2016). Se han realizado numerosos estudios para evaluar la influencia de algunos factores en la digestión de almidón, dentro de



los que se encuentran: microestructura (Goebel et al., 2019; Tamura et al., 2016a; Tian, Ogawa, et al., 2018); tamaño de partícula (Dhital, Shrestha, & Gidley, 2010; Ramírez et al., 2019); efectos del método de preparación (Kingman & Englyst, 1994; Tian et al., 2016); del grado de cocción (Tamura et al., 2016b); retrogradación (Chen et al., 2018; Colussi et al., 2018); del almacenamiento (Colussi et al., 2017); así como modificaciones del almidón (Chung, Shin, & Lim, 2008) e impactos de la pared celular (Boukid et al., 2019; Do et al., 2019; Rovalino-Córdova, Fogliano, & Capuano, 2018; Tian, Chen, et al., 2018). También se reportan estudios evaluando la influencia de otros componentes del alimento sobre la hidrólisis del almidón, tales como: proteínas (López-Barón et al., 2018; Lu et al., 2016), ácidos grasos (Kawai et al., 2012), gomas (Dartois et al., 2010), compuestos fenólicos (Moser et al., 2018), ácidos clorogénicos (Karim, Holmes, & Orfila, 2017), vitaminas hidrosolubles (Abell, Ratcliffe, & Gerrard, 1998; Borah, Sarkar, & Duary, 2019), entre otros.

### 3. METODOLOGÍA

En la figura 9 se puede observar el diagrama general de la investigación, donde, los números 1-4 corresponden a los objetivos específicos planteados.

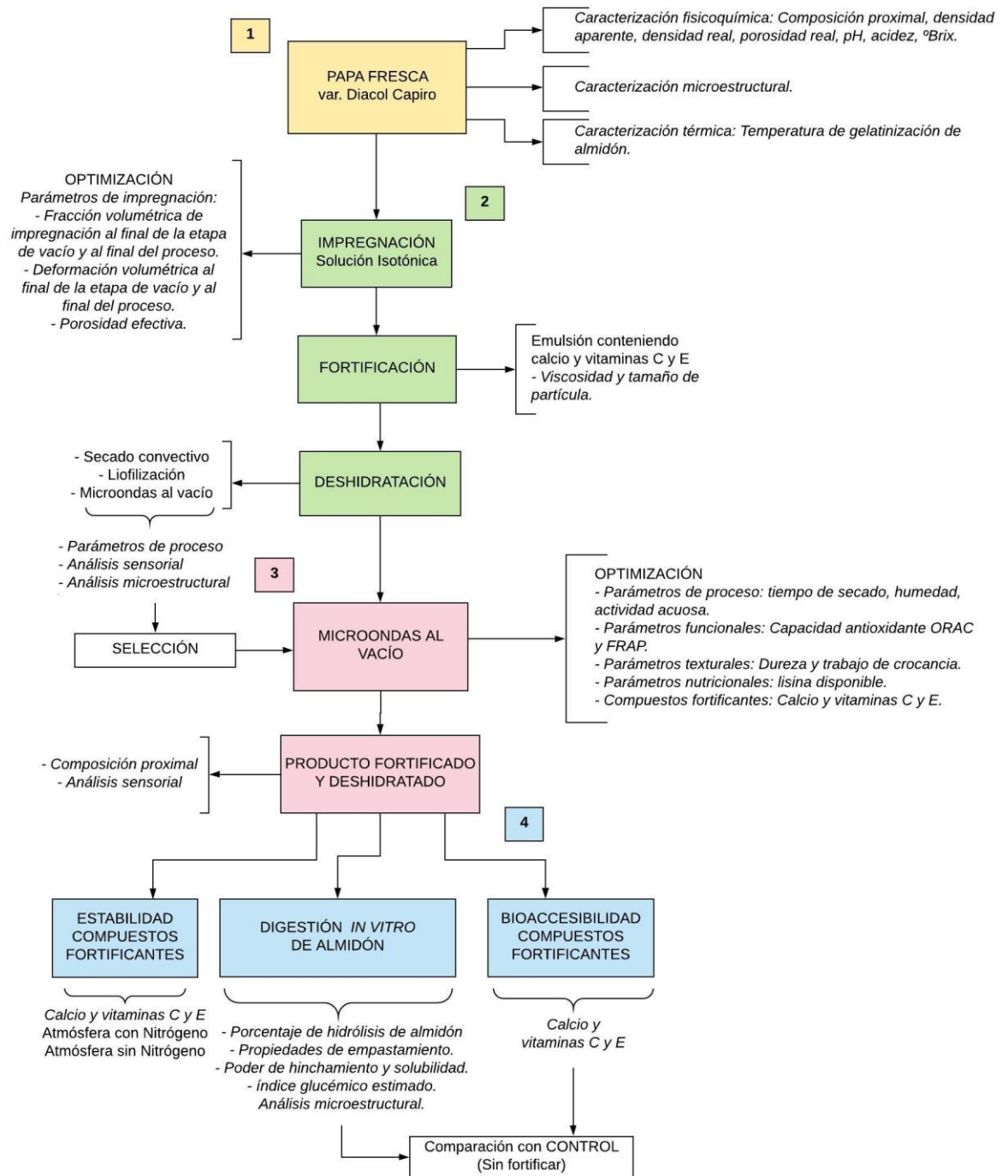


Figura 9. Diagrama general de la investigación.  
Elaboración propia.

Antes de describir cada uno de los pasos, se hará una breve descripción de todo el proceso metodológico. Inicialmente se adquirió la papa variedad Diacol Capiro con el fin de realizar la caracterización de algunas propiedades fisicoquímicas (humedad, actividad acuosa, densidad aparente, densidad real, porosidad real, pH, sólidos solubles, acidez, composición proximal) y térmicas (temperatura de gelatinización de almidón). Con lo anterior se da cumplimiento al objetivo específico N°1.

Una vez caracterizada la materia prima, se realizó la optimización del proceso de impregnación al vacío (14 experimentos), para obtener las condiciones permitieran la mayor incorporación de líquido de impregnación, de acuerdo a los parámetros característicos del proceso. A continuación, con esas condiciones se procedió a realizar la fortificación de la papa con los compuestos fortificantes seleccionados (calcio y vitaminas C y E). Posteriormente, las rodajas de papa fortificadas fueron sometidas a tres procesos de deshidratación: secado por aire caliente, liofilización y microondas al vacío y fueron evaluadas algunas características microestructurales y sensoriales, así como la cantidad de compuestos fortificantes que permanecía luego del secado. Con esto se da cumplimiento al objetivo específico N°2 y con base en los resultados obtenidos se seleccionó un proceso de secado, el microondas al vacío.

Con el proceso de secado seleccionado (microondas al vacío), se procedió a realizar una optimización del proceso variando condiciones de procesamiento, donde los diferentes tratamientos (18 experimentos) fueron evaluados desde parámetros fisicoquímicos (humedad y actividad de agua), texturales (dureza y trabajo de crocancia), funcionales (capacidad antioxidante), nutricionales (lisina disponible), así como la cantidad de compuestos fortificantes adicionados y la duración del proceso de secado. Con esto se da cumplimiento al objetivo específico N°3.

Finalmente, con las condiciones óptimas del proceso de secado, se prepararon nuevas muestras de chips deshidratados para evaluar la estabilidad de los compuestos adicionados durante tres meses de almacenamiento, para lo cual se utilizaron dos atmósferas de envasado, con y sin Nitrógeno adicionado. Por otro lado, muestras adicionales obtenidas con las

condiciones óptimas de secado fueron sometidas a un proceso de digestibilidad *in vitro* de almidón, donde adicionalmente se evaluó la bioaccesibilidad de los compuestos fortificantes luego del proceso de digestión. Con esto se da cumplimiento al objetivo específico N°4.

### **3.1 Materia prima**

Se utilizó papa variedad Diacol Capiro (figura 5), cosechada en el Municipio de la Unión, al Oriente de la ciudad de Medellín (Colombia), ubicada a 2500 m.s.n.m, con temperatura promedio de 13 °C y precipitación pluvial promedio mensual de 1988 mm (Gobierno Digital, 2019), sin evidencia de daño mecánico ni infestación. Se utilizaron papas con dos semanas de cosecha, de tal forma, que habían terminado su proceso de suberización, encontrándose en la etapa de dormancia, donde los tubérculos no presentaban crecimiento de brotes (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 1992).

Se seleccionaron papas de tamaño uniforme, según la Norma Técnica Colombiana NTC 341 (ICONTEC, 1996), que corresponde a un diámetro medio de 45 a 64 mm. Para el cálculo, el diámetro se tomó el eje más largo del tubérculo sin tomar en cuenta la posición de la inserción del estolón (figura 1) (ICONTEC, 1996). Con el fin de disminuir los residuos asociados al procesamiento industrial de las papas y debido al alto contenido de nutrientes presente en la cascara de las mismas, ésta se incluyó en la elaboración de los chips.

#### **3.1.1 Pretratamiento**

Previo a realizar la impregnación, las papas fueron lavadas, desinfectadas y cortadas en rodajas de 2,5 mm de espesor. Las rodajas de papa se realizaron utilizando una mandolina (Zyliss E11652) y con cortes perpendiculares al estolón, de tal forma que cada rodaja tuviera parte de tejido medular, de parénquima vascular y de corteza (figura 10). Posteriormente, fueron escaldadas con una relación papa: agua (1:10) durante 4 min a  $80 \pm 2$  °C (Leeratanarak, Devahastin, & Chiewchan, 2006), luego las papas fueron enfriadas y secadas con papel absorbente para eliminar el exceso de humedad.

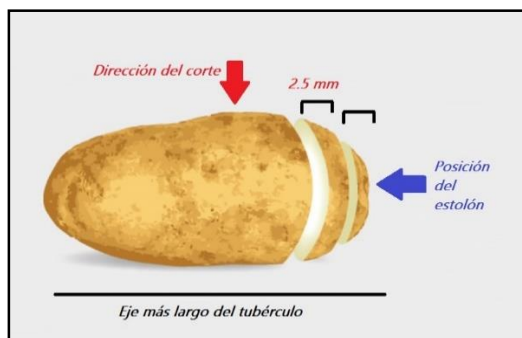


Figura 10. Preparación de las rodajas.  
Elaboración propia.

### 3.2. Etapa 1. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico N°1.

#### 3.2.1 Caracterización fisicoquímica

El contenido de humedad, proteína, grasa, ceniza se determinaron según la metodología AOAC, (2000), y los carbohidratos por diferencia (E. Kim & Kim, 2015). El contenido de almidón total fue determinado mediante un kit de almidón total (K-TSTA Megazyme International, Ireland) usando el formato DMSO (Dimetilsulfóxido) (AOAC, 2000). La actividad de agua fue medida usando un higrómetro de punto de rocío a 25 °C (AQUALAB-PRE) (AOAC, 2000).

La densidad aparente de la papa ( $\rho_a$ ) ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) fue determinada por la técnica de volumen desplazado con una probeta calibrada (Ciro, 2012), la papa (g) fue sumergida en una probeta con heptano ( $\text{cm}^3$ ) (Barreto et al., 2019) y la densidad aparente se determinó con la siguiente ecuación 2:

$$\rho_a = \frac{m_{papa}}{V_{desplazado}} \quad (2)$$

La densidad real ( $\rho_r$ ) ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) fue determinada a partir del contenido de humedad (H), donde fue considerado que la muestra está compuesta únicamente por carbohidratos y agua (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003; Ostos et al., 2012; Rao, 2014), según la ecuación 3:

$$\rho_r = \frac{1}{\frac{H}{1000} + \frac{1-H}{1500}} \quad (3)$$

La porosidad real ( $\varepsilon_r$ ) fue determinada de acuerdo a la ecuación 4 usando la densidad aparente y la densidad real (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003).

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (4)$$

La densidad de los líquidos de impregnación, tanto la solución isotónica como la emulsión fortificante fue determinada por picnometría (AOAC, 2000; Betalleluz, 2015).

Finalmente, el pH, °Brix y acidez (g ácido ascórbico · 100 g<sup>-1</sup> muestra) fueron determinados de acuerdo con (Hernández, 2014). El pH se determinó con un pHmetro (Hanna Instruments, USA), los °Brix con un refractómetro portátil (BRIXCO, Escala 0-32 %) y la acidez por titulación con NaOH 0,1 N utilizando fenolftaleína como indicador. Las mediciones fueron hechas por triplicado y expresadas como promedio ± desviación estándar (SD).

### 3.2.2. Contenido fenólico total y capacidad antioxidante de la papa fresca y los chips de papa deshidratados

Diferentes metodologías han sido empleadas para evaluar la capacidad antioxidante *in vitro*, por lo que es importante combinar al menos dos ensayos para proporcionar una idea de la capacidad antioxidante total de un alimento (Contreras-Calderón et al., 2011). En este estudio se incluyeron el método ORAC y el método FRAP. El primero utiliza el mecanismo de transferencia de un átomo de Hidrógeno (HAT, del inglés *Hydrogen Atom Transfer*) (Zapata, Piedrahita, & Rojano, 2014); mientras que el segundo utiliza el mecanismo de transferencia de electrones (SET, del inglés *Single Electron Transfer*) (Contreras-Calderón et al., 2016).

Para la obtención de los extractos, se siguió la metodología descrita por Contreras-Calderón, Calderón-Jaimes, Guerra-Hernández, & García-Villanova, (2011), con algunas modificaciones. Se pesó 1 g de papa en un tubo de centrífuga y se adicionaron 8 ml de solución metanol-agua (50:50, v/v pH 2). El tubo fue agitado en un vórtex (BV1000 Vortex Mixer Benchmark) durante 1 minuto y durante 1 h en un shaker (Incubator 1000 Heidolph Unimax 1010) a temperatura ambiente ( $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ ). Posteriormente, el tubo fue centrifugado por 10 min a 5000 rpm (Centrífuga Hettich EBA 20) y el sobrenadante fue recuperado y almacenado en la oscuridad. Al residuo, se le adicionaron 8 ml de solución acetona-agua (70:30) y se sometió a las mismas condiciones de agitación y centrifugación. Finalmente, los sobrenadantes fueron combinados, transferidos a un balón volumétrico de 25 ml y llevados a volumen. Los extractos obtenidos fueron almacenados en congelación ( $-20 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) toda la noche (12 h).

#### 3.2.2.1 Contenido Fenólico Total (TPC)

El Contenido Fenólico Total (TPC, del inglés *Total Phenolic Content*) fue calculado según la metodología descrita por Contreras-Calderón et al., (2011). En un tubo de ensayo pequeño (5 ml) se adicionaron 1580  $\mu\text{l}$  de agua destilada, 20  $\mu\text{l}$  de extracto y 100  $\mu\text{l}$  del reactivo de Folin-Ciocalteu, la solución se incubó durante 2 min antes de la adición de 300  $\mu\text{l}$  de solución de carbonato de sodio (20 % p/v). Se agitaron los tubos y se incubaron en oscuridad durante 1 h a temperatura ambiente ( $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ ). Después, se midió la absorbancia a 725 nm con agua destilada como blanco (Contreras-Calderón et al., 2011) en espectrofotómetro (UV-3300 Mapada Instruments, Shanghai, China) y el resultado se calculó utilizando una curva de calibración con ácido gálico. Los análisis se realizaron por triplicado y los resultados fueron expresados como mg equivalente de ácido gálico (GAE)  $\cdot 100\text{ g}^{-1}$  muestra.

#### 3.2.2.2 FRAP

La Capacidad de Reducción Férrica del Plasma (FRAP, del inglés *Ferric Reducing Ability of Plasma*), fue realizado bajo la metodología descrita por Contreras-Calderón et al.,

(2016). Se mezclaron 900  $\mu\text{l}$  del reactivo FRAP (conteniendo TPTZ,  $\text{FeCl}_3$  y buffer acetato), recién preparado y calentado a 37 °C en un baño de agua (Mettler), con 90  $\mu\text{l}$  de agua destilada y 30  $\mu\text{l}$  de muestra (diluida apropiadamente con agua) o solución estándar de Trolox. Las muestras fueron incubadas a 37 °C y después de 30 min se midió la absorbancia a 595 nm (UV-3300 Mapada Instruments, Shanghai, China). Soluciones acuosas de Trolox en concentraciones entre 0 y 500  $\mu\text{M}$  fueron usadas para construir la curva de calibración. Los resultados fueron expresados como micromoles de equivalente Trolox (TE) por gramo de sólido seco ( $\mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1}$  ss), como el promedio  $\pm$  desviación estándar (SD) de tres mediciones.

### 3.2.2.3 ORAC

La Capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno (ORAC, del inglés *Oxygen Radical Absorbance Capacity*), fue llevado a cabo de acuerdo a la metodología descrita por Jiménez et al., (2015). Fue utilizado como generador de radicales peroxilo el 2,2'-azobis (2-amidino-propano) dihidrocloruro (AAPH) y el Trolox fue usado como estándar, además, la fluoresceína se usó como sonda fluorescente. Las muestras fueron preparadas en buffer fosfato 75 mM a pH 7.4 y mezcladas con fluoresceína 1M (1:6) en microplacas negras, se incubaron por 30 min a 37 °C. Posteriormente, 250 mM AAPH en solución buffer fosfato fue adicionada en relación 1:7. La intensidad de fluoresceína fue medida cada minuto durante 120 min a longitud de onda de excitación y emisión de 485 y 520 nm, respectivamente., en un equipo Spectra Max Gemini EM – Molecular devices – (Orleans, USA). Los valores relativos ORAC fueron calculados utilizando las diferencias de áreas bajo las curvas de descomposición y los resultados fueron expresados como micromoles de equivalente Trolox (TE) por gramo de sólido seco ( $\mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1}$  ss), como el promedio  $\pm$  desviación estándar (SD) de tres mediciones.

### 3.2.3 Caracterización térmica de la papa cruda

Para la determinación de la temperatura de gelatinización de la papa variedad Diacolo Capiro, se utilizó la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC, del inglés



*Differential Scanning Calorimetry*) usando un DSC Q2000 TA Instruments (New Castle, DE). La muestra liofilizada fue mezclada con agua destilada en una relación 1:3 y el análisis se realizó desde 25 °C hasta 120 °C con una rampa de calentamiento de 10 °C/min (Chen et al., 2018). Para determinar la entalpía de gelatinización se utilizó el software TA Universal Analysis 2000 suministrado con el equipo. El análisis se realizó por duplicado y fue expresado como el promedio  $\pm$  desviación estándar.

### 3.2.4 Caracterización microestructural de la papa cruda, escaldada y los chips deshidratados

Para realizar la caracterización microestructural de la papa cruda, escaldada y de los chips deshidratados, se utilizó la metodología de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, del inglés *Scanning Electron Microscopy*) (Microscopio JEOL JSM-64990LV) (figura 11), con el fin de observar el tejido de la papa cruda (almidón nativo) y los cambios microestructurales luego de los procesos de escaldado y deshidratación. Las muestras se fijaron a cilindros metálicos por adhesión con cinta de grafito de doble faz y posteriormente recubiertas con oro. Los cilindros conteniendo las muestras se llevaron a la cámara del microscopio y en el caso de las muestras deshidratadas, adicionalmente se llevó a cabo un análisis elemental X-ray-EDX Microscope (INCA PentaFETx3 Oxford Instruments), con el fin de evidenciar el calcio presente en la matriz de la papa.



Figura 11. Microscopio Electrónico de Barrido utilizado en los análisis.

### 3.3. Etapa 2. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico N°2.

#### 3.3.1 Impregnación al vacío con solución isotónica de cloruro de sodio (NaCl)

El proceso de impregnación al vacío se realizó en un sistema diseñado en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (Centricol Ltda. Medellín, Colombia), el cual consta de una cámara en acero inoxidable, un sistema electromecánico que permite el movimiento de la muestra vertical y vibracional y una balanza de precisión para controlar la evolución de la masa de la rodaja de papa y del líquido de impregnación durante todo el proceso. Este sistema (figura 12), permitió calcular los parámetros característicos de impregnación: la fracción volumétrica de líquido de impregnación al final de la etapa de vacío y al final del proceso IV ( $X_1$ ,  $X$ , respectivamente), las deformaciones volumétricas de la estructura al final de la etapa a vacío y al final del proceso ( $Y_1$  y  $Y$ , respectivamente), y la porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ) del producto.



Figura 12. Equipo utilizado para la determinación de los parámetros característicos de impregnación.

Para determinar la concentración de cloruro de sodio (NaCl) a utilizar en las impregnaciones, primero se evaluó la actividad acuosa ( $a_w$ ) de varias soluciones utilizando diferentes concentraciones de NaCl (0 - 18 %). Esto, con el fin de utilizar una solución de NaCl que fuera isotónica al tubérculo, es decir, con una  $a_w$  similar a la de la papa, de tal

manera que se involucrara principalmente el mecanismo de transferencia de masa por mecanismo hidrodinámico (Hernández, 2014). Finalmente, se optimizó el proceso de impregnación utilizando la solución isotónica para lo cual se utilizó un diseño experimental central compuesto descrito posteriormente en la sección 3.6.1 y con las condiciones obtenidas de presión de vacío, tiempo de vacío y tiempo de restauración (tiempo a presión atmosférica en que el alimento continuó sumergido), se prosiguió a realizar la impregnación con la emulsión de fortificación.

### 3.3.2 Impregnación al vacío con emulsión de fortificación

Como compuestos fortificantes se seleccionaron el calcio, la vitamina C y la vitamina E y el criterio de fortificación se fijó de acuerdo a los Valores Diarios de Referencia (VDR) de consumo de nutrientes para niños mayores de 4 años y adultos, establecidos en la Resolución 333 de 2011 del Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia: 10 % VDR calcio (100 mg de Ca), 100 % VDR vitamina C (60 mg de VitC) y 100 % VDR vitamina E (20 mg de VitE) en 100 g de papa fresca (Ministerio de la Protección Social, 2011).

Las cantidades de calcio y vitaminas en la formulación de la emulsión, se determinaron bajo la consideración de que no había degradación de los compuestos durante los procesos de homogenización e impregnación, y siguiendo la metodología desarrollada por Cortés-Rodríguez, (2004), a partir de la fracción volumétrica de impregnación (X) calculada con las condiciones óptimas de impregnación con la solución isotónica de NaCl. Para este fin, se utilizaron las ecuaciones 5 y 6, donde la cantidad de los compuestos fisiológicamente activos (CFA) se calculó análogamente para el calcio, y las vitaminas C y E.

$$X_{CFA}^{IV} = \frac{\text{Peso a incorporar del CFA (g)}}{100 + 100 \times X \times \frac{\rho^{liq}}{\rho_{apm}}} \quad (5)$$

$$Y^{CFA} = \frac{x_{CFA}^{IV} (\rho_a + X \rho^{liq}) - x_{CFA}^0 \rho_a}{X \rho^{liq}} \quad (6)$$

donde  $X$  es la fracción volumétrica de impregnación,  $X_{CFA}^{IV}$  es la fracción másica de CFA en la matriz impregnada,  $\rho_a$  es la densidad aparente de la papa,  $\rho_{liq}$  es la densidad del líquido de impregnación,  $Y^{CFA}$  es la fracción másica de CFA en el líquido de impregnación y  $x_{CFA}^{\circ}$  es la fracción másica de CFA en la matriz fresca.

### 3.3.2.1 Preparación de la emulsión de impregnación

Fueron preparados lotes de emulsión de 1000 g, sobre una base acuosa isotónica, a la que fueron adicionados los compuestos fortificantes, según las cantidades determinadas en el punto anterior. Adicionalmente, se utilizaron los tensoactivos no iónicos Tween 80 (Polioxietilen Sorbitan Monooleato) (0,051 %) y Span 60 (Monoestearato de Sorbitano) (0,049 %), con un balance hidrófilo lipófilo de 15 y 4,7, respectivamente (Botero, 2008; Cortés, 2004).

La emulsión fue preparada utilizando un homogenizador (Ultraturrax Microdistech, MDT 1000, USA) a 20000 rpm durante cuatro ciclos de 3-min, cada uno de los cuales estuvo seguido de 3-min de reposo, con el fin de controlar la temperatura del sistema (Cortes & Chiralt, 2008).

### 3.3.2.2 Caracterización de la emulsión de impregnación

Se determinaron el tamaño de partícula y la viscosidad aparente en la emulsión de impregnación. El tamaño de partícula fue analizado con un equipo Zetasizer Nano-ZS90, equipado con el software (version 7.11, Malvern Instruments Ltd., UK). Las cuantificaciones de tamaño de partícula se realizaron mediante dispersión de luz dinámica a 25 °C, el cual mide las fluctuaciones de la intensidad de la dispersión en función del tiempo (Díaz Uribe & Vallejo, 2015), usando un tiempo de equilibrio de 2 min. El análisis se determinó a una longitud de onda de 677 nm usando un láser de estado sólido de 15 mWatts como fuente de luz, la luz dispersa se detectó con un ángulo de dispersión de 90° (Rojas et al., 2019).

Finalmente, la viscosidad aparente fue determinada usando un reómetro de cilindros concéntricos (Bohlin Gemini – HR Nano) a  $25 \pm 2$  °C (Castagnini, 2015).

### 3.3.3 Deshidratación de las rodajas de papa fortificadas

Una vez obtenidas las rodajas de papa fortificadas, éstas fueron sometidas a tres procesos de secado diferentes, modificando brevemente la metodología propuesta por Setiady, Tang, et al., (2009), con el fin de evaluar la cantidad de compuestos que permanecían luego de la deshidratación y posteriormente evaluar la microestructura y la calidad sensorial. También se evaluó la humedad y la actividad de agua según la metodología descrita en el numeral 3.2.1

#### 3.3.3.1 Secado por aire caliente (HAD)

El proceso de secado por aire caliente fue llevado a cabo en un túnel de convección tipo bandeja (figura 13), el cual consiste de un ventilador conectado a la resistencia eléctrica para producir el calentamiento del aire. La pérdida de peso fue monitoreada con una balanza Vector® S-type scale, 5AX797, con un error  $\pm 0,1$  g. La temperatura fue fijada a 60 °C (Setiady, Rasco, et al., 2009; Setiady, Tang, et al., 2009) y la velocidad de aire  $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . El secado fue realizado en bandejas de 0,5 m x 0,25 m y el proceso se llevó hasta peso constante, con un tiempo total de operación de 6 h.



Figura 13. Equipo utilizado para el secado por aire caliente de las rodajas de papa fortificadas.

### 3.3.3.2 Secado por liofilización (FD)

Se utilizó un liofilizador Labconco Freeze Dryer 3, Cat 75200 (figura 14), con una presión de vacío de -90 kPa y una temperatura del condensador de -40 °C. El proceso de liofilización se realizó durante 48 h y las muestras fueron previa e independientemente congeladas en un ultracongelador a -80 °C por 20 h (Sanyo, Tokio, Japón) (Setiady, Rasco, et al., 2009; Setiady, Tang, et al., 2009).



*Figura 14. Equipo utilizado para la liofilización de las rodajas de papa fortificadas.*

### 3.3.3.3 Secado por microondas al vacío (MVD)

Se utilizó un microondas al vacío semi-industrial, esquematizado en la figura 15, con magnetrones (CW 2450 MHz, Toshiba, China) y bomba de vacío (Lanphan 2XZ-4, Zhengzhou, China).

El Sistema está equipado con dos bandejas rotatorias de 0,5 m de diámetro, que giran a una velocidad de 6 rpm. La potencia de entrada es de 1,6 kW y la potencia de salida de 0,6 kW. Las microondas fueron aplicadas bajo el modo de temperatura controlada, la cual se fijó en 60 °C (Setiady, Rasco, et al., 2009; Setiady, Tang, et al., 2009); de esta forma, el sistema automáticamente regula la inducción de las microondas, de tal forma que no supere la temperatura establecida. El proceso se realizó a una presión absoluta de 4,32 kPa y tuvo una duración de 20 min.

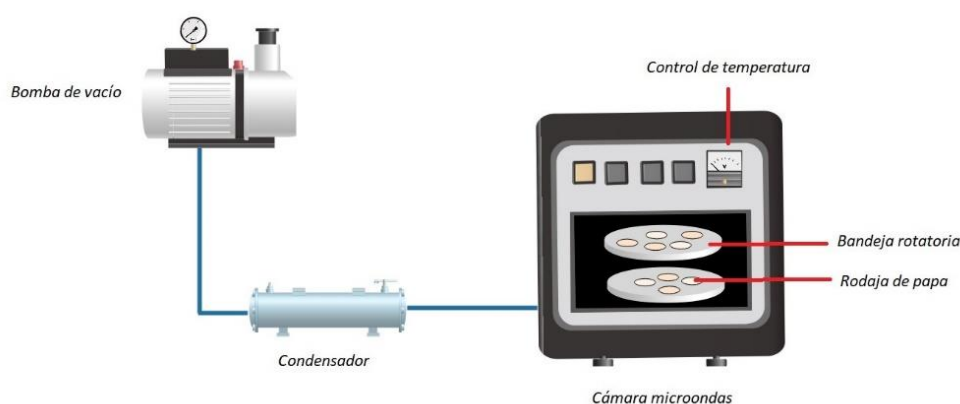


Figura 15. Representación del equipo utilizado para la deshidratación por microondas a vacío de las rodajas de papa fortificadas.  
Elaboración propia.

### 3.3.4 Cuantificación de calcio y vitaminas C y E en papa fresca, impregnada y deshidratada

El análisis de calcio fue realizado por absorción atómica según la metodología de la AOAC, (2000), brevemente se describe a continuación: las muestras inicialmente son calcinadas por 4 h a 550 °C y digeridas con ácido nítrico y ácido clorhídrico antes del análisis. Por otro lado, la vitamina C se determinó según la metodología empleada por Contreras-Calderón et al., (2011), basada en la titulación de las muestras diluidas usando el indicador 2,6 diclorofenolindofenol. Finalmente, la vitamina E fue cuantificada por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, del inglés *High Performance Liquid Chromatography*) (Agilent 1100, CA, USA) con un detector UV/Vis a una longitud de onda de 280 nm (Cortés, 2004). La separación fue llevada a cabo utilizando una columna fase reversa Zorbax C<sub>18</sub> (4.6 mm x 150 mm x 5 µm), un flujo de 2 ml·min<sup>-1</sup> a una temperatura de 45 °C. La fase móvil fue acetonitrilo: metanol (70:30). La cuantificación fue llevada a cabo mediante calibración con un estándar de vitamina E (Dl- $\alpha$ -tocoferol acetato, Sigma-Aldrich ®).

### 3.3.5 Análisis sensorial multidimensional de chips deshidratados

El análisis sensorial de los chips de papa fortificados y deshidratados fue realizado en el Laboratorio de Análisis Sensorial de la Universidad de Antioquia, usando un perfil

multidimensional (NTC 3932,1996: ISO 11035:1994) (ICONTEC, 1996), con un panel compuesto por cinco jueces entrenados. Los jueces identificaron los descriptores relevantes en cuanto al olor, sabor y textura, para proporcionar la máxima cantidad de información acerca de los atributos sensoriales de las muestras y establecer un perfil sensorial. La escala usada para calificar las intensidades de los descriptores iba de 0 a 5, donde 0 es *ausencia*, 1 es *muy débil*, 2 es *débil*, 3 es *moderado*, 4 es *fuerte* y 5 es *intenso*. La evaluación fue llevada a cabo en cubículos individuales con una temperatura de  $24,0 \pm 0,2$  °C y humedad relativa de  $60 \pm 1,0$  %. También fue evaluada la calidad general de los chips, en una escala de 1 a 3, donde 1 es *baja*, 2 es *media* y 3 es *alta* calidad.

### 3.3.6 Selección de un proceso de secado

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con los tres procesos de deshidratación evaluados: HAD, FD y MVD, en cuanto a características fisicoquímicas, microestructura y calidad sensorial, se seleccionó un método de secado para continuar con el desarrollo de la investigación.

## 3.4. Etapa 3. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico N°3.

### 3.4.1 Preparación de las rodajas de papa fortificadas

La fortificación de las rodajas de papa se realizó empleando un sistema como el esquematizado en la figura 16, el cual consistía en una bomba de vacío (Welch, Gardner Denver Thomas, Inc. Sheboygan, Wisconsin, USA) adaptada a un desecador, para lo cual se aplicaron las condiciones óptimas de impregnación obtenidas en el numeral 3.6.1. Las rodajas de papa previamente escaldadas fueron colocadas en un desecador manteniendo la proporción 1:5 papa: emulsión de impregnación (Ciro, 2012) para conseguir una adecuada inmersión, además, se utilizó una malla para separar las rodajas dentro del desecador en diferentes niveles. El sistema se sometió a las condiciones óptimas de proceso, esto es, una Presión de vacío (PV)= 77,3 kPa durante un tiempo de vacío ( $t_1$ ) = 3,0 min, posteriormente, el vacío fue restaurado y las rodajas permanecieron sumergidas durante tiempo de



restauración ( $t_2$ ) = 4,0 min. Finalmente, las muestras se sacaron del desecador y se secaron con papel absorbente para remover el exceso de líquido. El proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente sin agitación ( $25 \pm 2$  °C).

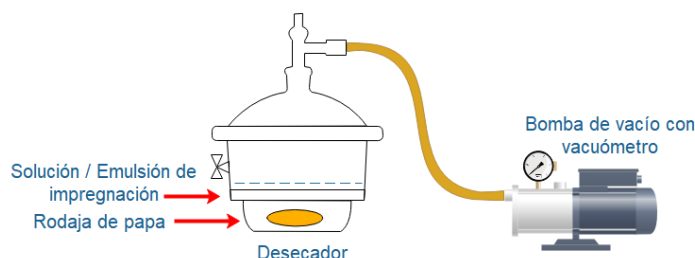


Figura 16. Representación del sistema utilizado para la fortificación de las rodajas de papa con las condiciones óptimas de impregnación.  
Elaboración propia.

### 3.4.2 Secado por microondas al vacío de la papa fortificada

Las rodajas de papa fortificadas fueron sometidas a un secado por microondas al vacío y con el fin de determinar las mejores condiciones en el proceso de secado se utilizó un diseño experimental central compuesto descrito en la sección 3.6.2. Para los chips deshidratados, se evaluaron características fisicoquímicas: humedad y actividad de agua (según la metodología descrita en 3.2.1), texturales, funcionales (capacidad antioxidante ORAC y FRAP, según la metodología descrita en 3.2.2), nutricionales (lisina disponible) y la cantidad de compuestos fortificantes adicionados, según la metodología descrita en 3.3.4.

### 3.4.3 Características texturales de los chips de papa deshidratados

Se realizaron ensayos de punción a  $25 \pm 2$  °C con un analizador de textura TAXT-plus (Stable Micro Systems Ltd., Vienna Court, Surrey, UK) (figura 17) para lo cual se utilizó una sonda esférica de 0,25 pulgadas de diámetro (6,35 mm). Los análisis se llevaron a cabo de acuerdo a Huang et al., (2011), con las siguientes modificaciones: velocidad test, pre-test y post-test de 2 mm/s. La distancia de penetración fue de 10 mm y la fuerza de disparo de 20 g. En la prueba de penetración, la dureza es la máxima fuerza requerida para romper la

muestra (Luo et al., 2019). Por su parte, el trabajo de crocancia ( $W_c$ ) fue determinada según Azzollini, Derossi, Fogliano, Lakemond, & Severini, (2018). Fueron utilizadas ocho muestras en cada tratamiento.

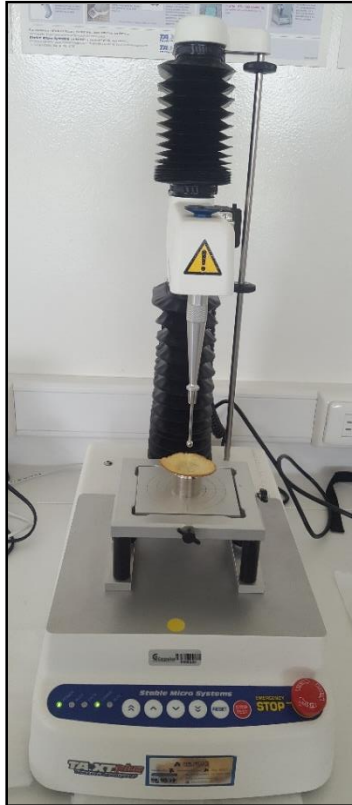


Figura 17. Equipo utilizado para realizar los ensayos de punción de los chips fortificados.

#### 3.4.4 Características nutricionales de los chips de papa deshidratados: lisina disponible

La lisina disponible fue determinada mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) del N- $\epsilon$ -dinitrofenil-lisina (N-  $\epsilon$  -DNP-lisina) obtenida luego de la hidrólisis ácida de proteínas y formada por la reacción del grupo amino libre de la lisina con el fluorodinitrobenzoceno (FDNB), de acuerdo con la metodología usada por Gómez-Narváez, Contreras-Calderón, & Pérez-Martínez, (2019). Brevemente, una muestra de papa equivalente a 4 mg de proteína fue transformada a través de derivatización mediante la adición de 1-fluoro-2,4-dinitrobenzoceno (FDNB). La hidrólisis se realizó con HCl 7,95 N. El análisis se realizó en un HPLC (Shimadzu, Kyoto, Japan), con una bomba de gradiente

cuaternario (LC-20AD), detector de arreglo de diodos (SPD-M20A) y automuestreador (SIL-20A HT). Se utilizó una columna cromatográfica Merck LiChospher 100 RP-18 (5  $\mu\text{m}$ ) in LiChroCART 250-4, con fase móvil Metanol – Acetato de Sodio 0,01 M pH 5 (1:1), flujo de  $1,0 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  y el volumen de inyección fue 20  $\mu\text{L}$ . La longitud de onda del detector se fijó en 360 nm y los resultados fueron expresados como miligramos de lisina en 100 gramos de sólido seco ( $\text{mg lys} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ ss}$ ) como el promedio  $\pm$  desviación estándar (SD) de dos mediciones.

#### 3.4.5 Análisis Proximal de los chips de papa deshidratados con las condiciones óptimas de secado

Una vez determinadas las condiciones óptimas de secado por microondas al vacío mediante el diseño experimental descrito en el numeral 3.6.2, se procedió a determinar el contenido de humedad, grasa, proteína, cenizas y carbohidratos de los chips deshidratados con las condiciones óptimas, utilizando la metodología descrita en el numeral 3.2.1

Adicionalmente, se determinó el contenido de calcio y vitaminas C y E según la metodología descrita en el numeral 3.3.4.

#### 3.4.6. Análisis sensorial multidimensional de los chips de papa deshidratados con las condiciones óptimas de secado

Se realizó un análisis sensorial multidimensional a los chips obtenidos con las condiciones óptimas MVD utilizando la metodología descrita en el numeral 3.3.5.

### **3.5. Etapa 4. Metodología para el cumplimiento del objetivo específico N°4.**

Para el cumplimiento del objetivo específico N°4, se procedió a preparar un nuevo lote de chips de papa con las condiciones óptimas de deshidratación obtenidas de acuerdo al diseño experimental descrito en el numeral 3.6.2. Las muestras fueron empacadas en bolsas negras flexibles de polietileno de tereftalato – foil de aluminio – polietileno de baja densidad

(PET/Foil/LDPE), calibre 78 (figura 18) y almacenadas a  $25 \pm 2$  °C hasta la realización de los análisis.



Figura 18. Empaque utilizado para el almacenamiento de las muestras.  
Tomado de AgrOfertas, (2018).

### 3.5.1. Estabilidad de compuestos adicionados durante el almacenamiento

El contenido de calcio, vitamina E y vitamina C fue evaluado cada tres semanas, durante tres meses de almacenamiento según la metodología descrita en el numeral 3.3.4 y el análisis estadístico se realizó de acuerdo con lo establecido en el numeral 3.6.3. Se utilizaron dos atmósferas, a saber: con Nitrógeno adicionado (100N) y sin Nitrógeno (0N). En el último caso, las muestras fueron empacadas en condiciones normales de aire. Todas las muestras fueron almacenadas a  $25 \pm 2$  °C y un paquete diferente fue utilizado para cada análisis (figura 19).



Figura 19. Muestras para análisis de estabilidad de compuestos adicionados.

### 3.5.2 Digestibilidad del almidón

#### 3.5.2.1 Preparación de chips sin fortificar (SF)

Se prepararon chips de papa sin fortificar (SF) y deshidratados con las condiciones óptimas de MVD obtenidos en el numeral 3.6.2, los cuales se utilizaron como control para determinar la hidrólisis de almidón durante la digestión *in vitro*, así como en la determinación de las propiedades de empastamiento, el poder de hinchamiento y solubilidad, el índice glucémico estimado y los cambios microestructurales durante la digestión. Estos experimentos adicionales se realizaron con el fin de complementar los resultados obtenidos para la digestibilidad *in vitro* del almidón.

Se determinó el contenido de calcio, vitamina C y vitamina E en los chips de papa sin fortificar según la metodología descrita en el numeral 3.3.4

#### 3.5.2.2 Digestibilidad *in vitro* del almidón

Se determinó la digestibilidad *in vitro* del almidón, de los chips de papa fortificadas (F), y se utilizaron chips deshidratados sin fortificar (SF) como control. Para evaluar la hidrólisis de almidón presente en los chips, se utilizó un modelo *in vitro* de digestión en dos etapas (Dartois et al., 2010), para lo cual, se utilizaron reactores de vidrio con chaqueta de calentamiento, conectada a un baño de agua con el fin de mantener la temperatura a  $37 \pm 1$  °C durante todo el proceso. Se prepararon los Fluidos Gástrico (SGF) e Intestinal (SIF) de acuerdo con la US Pharmacopeia (Pharmacopeia, 2000). Se agregaron 170 g de muestra conteniendo 4 % almidón (p/p) a los reactores de vidrio de 500 ml de capacidad, se mantuvieron en agitación constante a 300 rpm y se utilizó una malla de polietileno para evitar daño físico al tejido debido a la barra magnética (figura 20).

Inicialmente, el pH fue ajustado a 1,2 usando 3 M HCl y 0,5 M HCl, y se adicionaron 25 ml de SGF conteniendo pepsina para iniciar la hidrólisis. Se tomaron alícuotas (0,5 ml)

después de 0, 15 y 30 min de digestión gástrica (referidas como G0, G15 y G30) e inmediatamente se mezclaron con etanol 96 % (2 ml) con el fin de detener la hidrólisis.

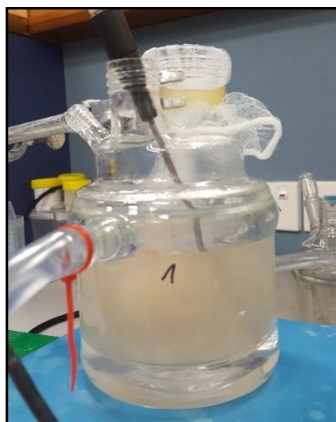


Figura 20. Reactor de vidrio utilizado para evaluar la hidrólisis de almidón.

Después de 30 min la pepsina fue inactivada, lo cual se realizó ajustando el pH a 6,8, mediante la adición de 3 M NaOH y 0,5 M NaOH, luego se adicionaron 22 ml de SIF conteniendo pancreatina, amiloglucosidasa e invertasa, para simular la digestión en el intestino delgado. Se tomaron alícuotas (0,5 ml) después de 0, 5, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 min de digestión intestinal (referidas como I0, I5, I10, I15, I30, I60, I90 and I120), e inmediatamente se mezclaron con etanol 96 % (2 ml) con el fin de detener la hidrólisis.

Posteriormente, las muestras fueron incubadas con una solución amiloglucosidasa/invertasa como lo describen Dartois et al., (2010) y luego la glucosa fue determinada usando el reactivo glucosa oxidasa / peroxidasa GOPOD (Format K-GLUK 07/11, Megazyme International Ireland Ltd, Ireland). Los resultados fueron expresados como porcentaje de hidrólisis de almidón siguiendo las ecuaciones 7 y 8

$$\% S_H = S_h / S_i \quad (7)$$

$$\% S_H = 0,9 \times G_p / S_i \quad (8)$$

donde %  $SH$  es el porcentaje de hidrólisis de almidón (total).  $Sh$  es la cantidad de almidón hidrolizado,  $Si$  la cantidad inicial de almidón (g) y  $Gp$  la cantidad de glucosa producida (g), 0,9 es el factor de conversión de almidón a glucosa, el cual generalmente se calcula del peso molecular del monómero de almidón y el peso molecular de la glucosa ( $162/180 = 0,9$ ) (Bordoloi, Singh, & Kaur, 2012).

### 3.5.2.3 Determinación de las propiedades de empastamiento

Las propiedades de empastamiento del almidón de los chips de papa fortificados (F) y sin fortificar (SF) fueron obtenidas usando un Analizador Rápido de Viscosidad (RVA, del inglés *Rapid Visco Analyzer*) (Newport Scientific, Sydney, Australia) (figura 21), utilizando el método 7.7 RVATM Almidón de papa (2,0 g de almidón y 14 % humedad) (Chen et al., 2018).



Figura 21. *Rapid Visco Analyzer* utilizado para las mediciones.

La prueba está dividida en 5 etapas, 1) adición de agua a la muestra, 2) calentamiento, 3) sostenimiento a la máxima temperatura, 4) enfriamiento y 5) sostenimiento final (Balet et al., 2019). En este caso, las muestras fueron equilibradas a 50 °C por un minuto, calentadas y mantenidas a 95 °C por 3 min y luego enfriadas y mantenidas a 50 °C por 2 min, con una velocidad de rotación mantenida a 160 rpm durante todo el proceso. Las pruebas fueron realizadas por triplicado y las mediciones típicas (viscosidad final, viscosidad pico,

viscosidad de la pasta caliente, temperatura de empastamiento) fueron directamente obtenidas del software TCW3 (Newport Scientific Pty. Ltd., Australia).

#### 3.5.2.4 Determinación del poder de hinchamiento y solubilidad

El poder de hinchamiento y solubilidad de los chips de papa fortificados (F) y sin fortificar (SF) fue determinado de acuerdo con Singh, McCarthy, Singh, Moughan, & Kaur, (2007). Las muestras fueron manualmente fragmentadas utilizando un mortero y mezcladas con agua destilada con el fin de obtener una suspensión conteniendo aproximadamente ~2 % (p/v) de almidón. La suspensión se calentó a 90 °C por 30 min y luego se llevó a temperatura ambiente. Posteriormente se centrifugó a 3500 g durante 20 min; el sobrenadante fue decantado y el residuo pesado para la determinación del poder de hinchamiento. La relación entre el residuo y la muestra inicial fue calculada (g/g en base seca) (ecuación 9) (Kusumayanti, Handayani, & Santosa, 2015). Para determinar la solubilidad, el sobrenadante fue secado hasta peso constante a 110 °C, el residuo obtenido después de secar el sobrenadante representa la solubilidad (ecuación 10) (Singh et al., 2003). Las mediciones fueron hechas a temperatura ambiente (25 ± 2°C) y se realizaron por triplicado.

$$\text{Poder de hinchamiento} = \frac{\text{Peso del residuo (g)}}{\text{Peso de la muestra (bs)(g)}} \quad (9)$$

$$\% \text{ solubilidad} = \frac{\text{Peso sobrenadante seco (g)}}{\text{Peso de la muestra (bs)(g)}} \times 100 \quad (10)$$

#### 3.5.2.5 Determinación del índice glucémico estimado (eGI)

El índice glucémico estimado (eGI) de los chips de papa fortificados (F) y sin fortificar (SF) fue calculado siguiendo la ecuación utilizada por Chen et al., (2018); Goñi, García-Alonso, & Saura-Calixto, (1997) (ecuación 11):

$$eGI = 39,71 + 0,549 \times HI \quad (11)$$



donde HI es el índice de hidrólisis de las muestras, calculada como el área bajo la curva durante la digestión simulada del intestino delgado, usando pan blanco como referencia (Chen et al., 2018).

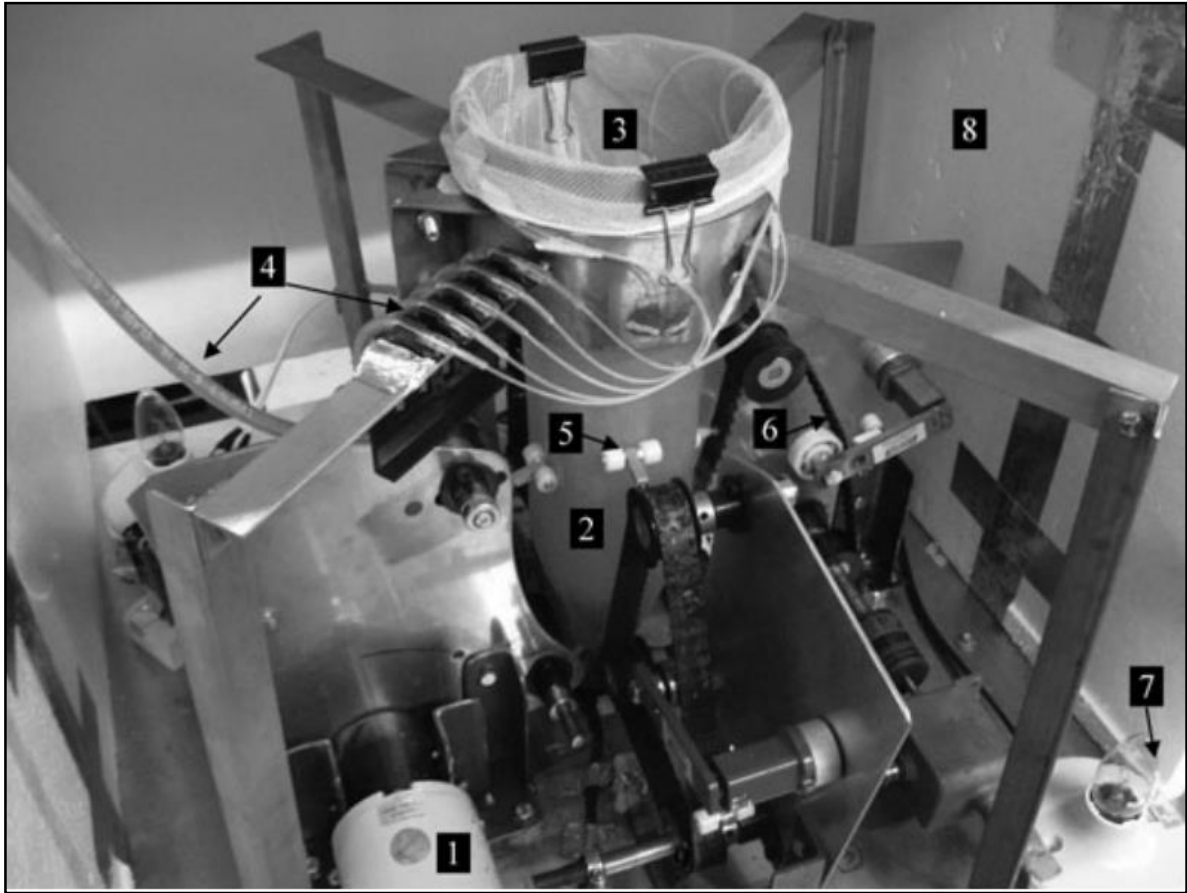
### 3.5.2.6 Características microestructurales de la digesta

Se utilizó la Microscopía Electrónica de Barrido, con el fin de examinar los cambios de las muestras fortificadas (F) y sin fortificar (SF) durante el proceso de digestión *in vitro*. Se tomaron muestras a tiempos determinados, a saber: antes de empezar el proceso de digestión gástrico (BS), al final del proceso de digestión gástrico (G30) y después de 10, 60 y 120 min de digestión intestinal (referidos como I10, I60 e I120, respectivamente). Las muestras fueron colocadas en tubos Eppendorf de 2 ml, inmediatamente congeladas por inmersión en Nitrógeno líquido y almacenadas a -80 °C antes de la liofilización (Bordoloi, Singh, et al., 2012). Las muestras liofilizadas se montaron directamente en cintas adhesivas de doble cara, en trozos de aluminio, recubiertas con oro (SCD 050, Balzers, Liechtenstein) y posteriormente observadas bajo un microscopio (FEI Quanta 200 FEI Electron Optics, Eindhoven, The Netherlands) (Do et al., 2019). Las micrografías fueron tomadas con voltaje de 20 kV usando el software xT version 3.0.7 (FEI Quanta, Eindhoven, the Netherlands).

### 3.5.3 Estimación de la bioaccesibilidad de los compuestos adicionados

Con el fin de estimar la cantidad de compuestos fortificantes luego de la digestión, fue incluida una primera etapa de digestión oral y fue utilizado un modelo dinámico de digestión *in vitro*, el Simulador de digestión humano (HDS, del inglés *Human Digestion Simulator*), representado en la figura 22. También conocido como Modelo Riddet, fue específicamente diseñado y desarrollado por Kong & Singh, (2010) para simular la actividad peristáltica de las ondas de contracción antral como fueron reportadas *in vivo* por Kwiatek et al., (2006); Schwizer, Steingoetter, (2006). Por lo tanto, este modelo se encarga de reproducir las condiciones mecánicas de los fluidos que impulsan la desintegración y la mezcla de contenidos durante la digestión (Ferrua & Singh, 2015). El dispositivo está compuesto por

una bolsa de látex acoplado a un sistema de poleas que se encarga de proporcionar movimientos peristálticos a los lados de la bolsa blanda (Goebel et al., 2019).



*Figura 22. Simulador de Digestión Humano utilizado.*

*Donde 1) motor, 2) revestimiento de látex, 3) malla, 4) tubo de secreción, 5) rodillo, 6) cinturón 7) bombillo para control de temperatura y 8) aislamiento de espuma plástica. Tomado de Kong & Singh, (2010).*

Inicialmente los chips fueron digeridos por 2 min con un fluido salivar simulado (SSF) preparado de acuerdo con Goebel et al., (2019) y manualmente triturados para simular la digestión oral (Tamura et al., 2017). Posteriormente, la mezcla fue adicionada al HDS donde se mantuvo 30 min en digestión gástrica y 2 h en digestión intestinal (Goebel et al., 2019), para lo que se ajustó el pH y se utilizaron los fluidos simulados gástrico e intestinal de acuerdo a la relación descrita en el numeral 3.5.2.2. El dispositivo fue ajustado a una frecuencia de 1 ciclo cada 2,33 min (Goebel et al., 2019). Finalizado el proceso de digestión, el total de la digesta fue centrifugado a 5000 rpm durante 20 min a 25 °C (Rodríguez-Roque, 2014) para realizar las estimaciones de bioaccesibilidad.

La bioaccesibilidad, se define como la cantidad de un componente del alimento que está presente en el intestino humano, como consecuencia de su liberación de la matriz del alimento (Quirós Saucedo et al., 2011) y que por lo tanto podría ser potencialmente disponible para la absorción en el intestino (Mandalari et al., 2013). En ese sentido, para determinar la bioaccesibilidad se utilizó la ecuación 12 (Guerrero, 2016; Rodríguez-Roque, 2014; Yang & McClements, 2013).

$$\% \text{ Bioaccesibilidad} = \frac{\text{Cantidad Digerida}}{\text{Cantidad No-Digerida}} \times 100 \quad (12)$$

donde, la cantidad digerida es la cantidad de analito presente luego del proceso de digestión mientras que la cantidad No-Digerida es la cantidad de analito presente antes del proceso de digestión.

Con fines comparativos, se estimó también la bioaccesibilidad de los compuestos adicionados (calcio, vitamina C y vitamina E) que estaban presentes de forma natural en los chips de papa sin fortificar.

### **3.6 Diseño experimental y Análisis estadístico**

A continuación, se describen cada uno de los diseños experimentales utilizados, para lograr cada una de las metodologías y objetivos descritos con anterioridad. Todos los diseños se analizaron usando el software Statgraphics Centurion XVI (Statistical Graphics Corporation, Ver. 16.0.07, Rockville, USA).

#### **3.6.1 Diseño de experimentos para el proceso de impregnación al vacío (Objetivo N°2)**

Para la evaluación del proceso IV se utilizó la metodología de superficie de respuesta por medio de un diseño Central Compuesto Cara Centrada y cuatro puntos centrales, para un total de 18 experimentos (tabla 1). Las variables independientes y los valores de sus

respectivos niveles fueron: presión de vacío (VP) (50,8 kPa - 77,9 kPa), tiempo en la etapa de vacío ( $t_1$ ) (3 min – 5 min) y tiempo en la etapa de presión atmosférica ( $t_2$ ) (3 min – 5 min).

Tabla 1. Condiciones experimentales para el proceso de impregnación al vacío (IV).

Experimento	Factores		
	VP (kPa)	$t_1$ (min)	$t_2$ (min)
1	64,3	4	4
2	50,8	3	5
3	50,8	5	5
4	64,3	3	4
5	50,8	3	3
6	64,3	4	4
7	64,3	4	3
8	77,9	3	3
9	77,9	3	5
10	64,3	4	5
11	77,9	5	3
12	77,9	4	4
13	64,3	5	4
14	64,3	4	4
15	77,9	5	5
16	50,8	5	3
17	64,3	4	4
18	50,8	4	4

VP: Presión de vacío;  $t_1$ : tiempo de vacío;  $t_2$ : tiempo de restauración.

Como variables respuestas, se tomaron los diferentes parámetros de impregnación: las fracciones volumétricas de impregnación al final de la etapa a vacío y al final del proceso ( $X_1$ ,  $X$ , respectivamente), las deformaciones volumétricas de la estructura al final de la etapa a vacío y al final del proceso ( $Y_1$  y  $Y$ , respectivamente) y la porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ), los cuales fueron expresados como el promedio  $\pm$  desviación estándar de tres replicas. Los datos se analizaron por medio de una Tabla ANOVA, con un nivel de significancia del 95 %, buscando las posibles interacciones de segundo orden de cada una de las variables independientes sobre las variables respuestas analizadas. El modelo matemático utilizado se puede ver en la ecuación 13, donde  $b_0$  es una constante,  $b_i$  son los coeficientes del modelo

ligados a un efecto lineal,  $b_{ii}$  son los coeficientes del modelo ligados a un efecto cuadrático, y  $b_{ij}$  son las constantes para el efecto de las interacciones

$$Y = b_o + \sum_{i=1}^2 b_i X_i + \sum_{i=1}^2 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j=1}^2 b_{ij} X_i X_j \quad (13)$$

Los modelos obtenidos en el diseño experimental fueron optimizados para determinar los niveles de los factores que simultáneamente optimizaran las variables respuesta (máximo, mínimo o fijo, dependiendo del caso) y para el proceso de optimización fue usada la función *deseabilidad*. Esta función se encarga de transformar cada variable respuesta en una función de deseabilidad individual, que varía de 0 a 1. Este valor aumenta como el mayor valor de la variable respuesta correspondiente (Gutiérrez-Pulido, 2012). Finalmente, fue realizado un análisis de correlaciones de Pearson, con el fin de evaluar el grado de covariación entre las distintas variables (dependientes e independientes).

### 3.6.2 Diseño de experimentos para el proceso de secado por microondas al vacío (Objetivo N°3)

Para establecer las mejores condiciones del proceso de deshidratación mediante microondas al vacío, que permitieran una mayor conservación de los compuestos adicionados y buenas características funcionales, nutricionales y texturales, se aplicó la metodología de superficie de respuesta por medio de un diseño de experimentos Central Compuesto Cara Centrada con seis puntos centrales (14 experimentos) (tabla 2), tomando como variables independientes y sus respectivos niveles: Densidad de potencia (PD) (1,1 – 1,7 W/g) y Presión absoluta (AP) (4 -10 kPa). Como variables respuesta se tomaron: tiempo de secado, humedad, actividad acuosa, parámetros texturales: dureza y trabajo de crocancia, capacidad antioxidante: ORAC y FRAP; así como la cantidad de calcio, vitamina E, vitamina C y lisina disponible. Finalmente, fue realizado un análisis de correlaciones de Pearson, con el fin de evaluar el grado de covariación entre las distintas variables (dependientes e independientes).

Tabla 2. Condiciones experimentales para el proceso de secado por microondas al vacío (MVD).

Experimento	Factores	
	PD (W/g)	AP (kPa)
1	1,4	7
2	1,4	7
3	1,1	4
4	1,4	4
5	1,7	7
6	1,4	10
7	1,4	7
8	1,7	10
9	1,4	7
10	1,1	10
11	1,7	4
12	1,1	7
13	1,4	7
14	1,4	7

PD: Densidad de potencia; AP: Presión absoluta

### 3.6.3 Diseño de experimentos para la estabilidad de los Compuestos adicionados durante el almacenamiento (Objetivo N°4)

Se utilizó un diseño de experimentos de bloques completamente aleatorizado, tomando como factor principal: atmósfera de envasado, el cual contó con dos tratamientos 100N y 0N (contenido de Nitrógeno en el envasado); como factor de bloque se tomaron las semanas de almacenamiento con 6 niveles (0, 3, 6, 9, 12 y 15). Las variables respuesta fueron la cantidad de compuestos adicionados; calcio, vitamina C y vitamina E. Para el análisis del diseño, inicialmente se calculó la ANOVA con un nivel de confianza del 95 %, con el fin de determinar si las variables respuesta eran afectadas significativamente ( $p < 0,05$ ) tanto como por el factor principal como por el de bloque. Posteriormente, se procedió a determinar las diferencias significativas entre los tratamientos a través de una prueba de múltiples rangos por medio de una prueba de LSD con  $\alpha$ : 0,05.

#### 3.6.4 Análisis estadístico de la digestibilidad *in vitro* del almidón (Objetivo N°4)

Para los experimentos de digestibilidad *in vitro* de almidón, prueba de empastamiento, poder de hinchamiento y solubilidad e índice glucémico estimado, los resultados fueron expresados como promedio  $\pm$  desviación estándar de tres replicas, donde se tomó como factor el proceso de fortificación (Fortificado o Sin Fortificar). Para esto, se prepararon chips de papa deshidratada bajo las condiciones óptimas de secado obtenidas en el numeral 3.6.2, siguiendo el mismo pretratamiento, pero sin proceso de fortificación, para ser usados como control. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con prueba de LSD con  $\alpha$ : 0,05, para determinar diferencias significativas entre las medias a un nivel de significancia de  $p < 0,05$  usando el software Statgraphics Centurion XVI (Statistical Graphics Corporation, Ver. 16.0.07, Rockville, USA).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Etapa 1. Objetivo específico N°1

#### 4.1.1. Caracterización fisicoquímica

En la tabla 3, se muestran los parámetros fisicoquímicos obtenidos para la papa variedad Diacol Capiro, estos valores están en acuerdo con los reportados por diversos autores en diferentes variedades de papa, en general los diferentes parámetros oscilan para proteína (1,93 - 4,85 %), ceniza (0,95 - 1,13 %) y almidón (10 -18 %), sin embargo, el valor para el contenido de grasa fue ligeramente inferior a los reportes (0,1 - 0,5 %) (Calliope, Lobo, & Sammán, 2018; Kärenlampi & White, 2009; Singh & Kaur, 2016). El pH, los sólidos solubles y la acidez titulable concuerda con valores obtenidos por otros investigadores para la misma variedad de papa (Hernández, 2014; Hernández et al., 2014). Por su parte, el valor obtenido para la humedad está de acuerdo con reportes previos de la Gobernación de Antioquia, (2012) en que esta variedad de papa sobresale frente a las demás existentes en el país por su alto contenido de materia seca, lo que la hace una buena opción para usarse a nivel industrial (Barrientos, Rondón, & Melo, 2011; Hernández, 2014).

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica papa variedad Diacol Capiro.

Parámetro	Valor $\pm$ SD
Humedad (% bh)	77,07 $\pm$ 0,57
Ceniza (% bh)	1,31 $\pm$ 0,04
Grasa (% bh)	0,01 $\pm$ 0,00
Proteínas (% bh)	4,36 $\pm$ 0,23
Carbohidratos (% bh)	17,25 $\pm$ 1,18
Almidón (% bh)	16,73 $\pm$ 0,14
pH	6,46 $\pm$ 0,10
Sólidos solubles	4,6 $\pm$ 0,1
Acidez titulable	0,35 $\pm$ 0,01*
Densidad Aparente	0,92 $\pm$ 0,06**
Densidad Real	1,08 $\pm$ 0,57**
Porosidad Real (%)	14,5 $\pm$ 0,3
$a_w$	0,9964 $\pm$ 0,0007

bh: base húmeda; SD: desviación estándar.

\*Acidez titulable expresada como % ácido ascórbico

\*\*Densidad expresada en g·cm<sup>-3</sup>



Con respecto a los parámetros físicos mostrados en la tabla 3, se puede observar que el valor de porosidad real encontrado para la papa fue de 14.5 %, siendo mayor al reportado por Madiouli, Sghaier, Lecomte, & Sammouda, (2012); Singh, Katiyar, & Singh, (2015), quienes registraron valores entre 1 y 9 % para diferentes variedades de papa. Adicionalmente, el valor de porosidad real permite identificar la papa variedad Diacol Capiro, como una matriz adecuada para la aplicación del proceso de impregnación al vacío, ya que tiene espacios disponibles que pueden ser ocupados por los líquidos de impregnación (Cortés, Herrera, & Rodríguez, 2015; Hernández, 2014). Las diferencias entre los valores reportados en la literatura para las diferentes variedades de papa, con respecto a los obtenidos en esta investigación, se pueden deber a las condiciones ambientales propias de cada variedad de papa, tales como: suelo, humedad, temperatura, y a su vez, su morfología, composición, distribución interna de gránulos, entre otros factores relacionados (Singh & Kaur, 2016), ya que se ha demostrado que todas estas variables afectan la calidad de las papas para el procesamiento (Bradshaw et al., 2007; FAO, 2008a; Functional, In, & Potato, 2013; García Ruíz, Gutiérrez Sánchez, & Marín Montoya, 2015; Quinchoa et al., 2010).

Según lo anterior, la elección de la variedad de papa Diacol Capiro es una opción adecuada para la implementación de la técnica de impregnación al vacío para realizar la fortificación, así como su posterior estabilización y procesamiento industrial mediante procesos de deshidratación, especialmente por su alto contenido de materia seca.

#### 4.1.2 Contenido fenólico total y capacidad antioxidante de la papa cruda.

En la tabla 4, se muestra el contenido fenólico total (TPC) y capacidad antioxidante de la papa cruda, usando los métodos ORAC y FRAP. Diversos autores, reportan valores de estos parámetros: Zapata et al., (2014) encontraron un valor de fenoles totales ligeramente superior al encontrado en este estudio (113,6 mg GAE·100g<sup>-1</sup> ss) para la misma variedad de papa utilizada. Valores similares han sido encontrados por Perla, Holm, & Jayanty, (2012), quienes hallaron rangos de 94 - 155 mg GAE·100 g<sup>-1</sup> ss para papas amarillas; Kita, Bakowska-Barczak, Hamouz, Kułakowska, & Lisińska, (2013), encontraron valores superiores para papas de pulpa morada y roja, siendo de 283 – 844 mg GAE·100 g<sup>-1</sup> ss y

226-455 mg GAE·100 g<sup>-1</sup> ss, respectivamente. A pesar de que la cantidad de polifenoles totales de la papa es inferior a la encontrada en otras hortalizas como espinaca (1377,2 mg GAE·100 g<sup>-1</sup> ss), pimentón (948,7 mg GAE·100 g<sup>-1</sup> ss), coliflor (440,3 mg GAE·100 g<sup>-1</sup> ss) (Zapata et al., 2014); considerando el alto consumo de papa a nivel mundial, ésta es una fuente importante de antioxidantes, siendo reconocidos los polifenoles como los antioxidantes más abundantes en la dieta (Ezekiel et al., 2013). Se ha reportado que el contenido fenólico total presente en las papas está compuesto por ácidos clorogénicos tales como el cafeico, cinámico, p-cumárico, felúrico y sinápico (Agnieszka & Anna, 2018), los cuales en conjunto con la vitamina C son responsables de la capacidad antioxidante del tubérculo (Christelle Andre et al., 2007; Bartosz, 2014; Ezekiel et al., 2013).

Por su parte, los valores de capacidad antioxidante determinados según las metodologías FRAP y ORAC, son ligeramente inferiores a rangos previamente establecidos para este tubérculo, esto es, valores FRAP de 16,7 – 35,7 µmol TE·g<sup>-1</sup> ss (Kita et al., 2013) y ORAC de 28,25 – 250,67 µmol TE·g<sup>-1</sup> ss (Christele Andre et al., 2007); sin embargo, siendo éste último superior a los encontrados para la ahuyama (19,7 µmol TE·g<sup>-1</sup> ss), arracacha (9,4 µmol TE·g<sup>-1</sup> ss) y la yuca (3,7 µmol TE·g<sup>-1</sup> ss) (Zapata et al., 2014).

Según los resultados anteriores se puede considerar a la papa como una fuente importante de antioxidantes, debido principalmente a su frecuencia de consumo (Ezekiel et al., 2013). Lo anterior implica que proporcionar valor agregado a la papa a través de la fortificación con vitaminas como lo son la C y E, potenciaría aún más su capacidad antioxidante, pudiendo resultar en efectos benéficos para la salud.

*Tabla 4. Contenido fenólico total y capacidad antioxidante de papa cruda.*

<b>Parámetro papa var. Diacol Capiro</b>	<b>Valor ± SD</b>
Contenido Fenólico Total	103,63 ± 6,23 mg GAE·100g <sup>-1</sup> ss
FRAP	12,26 ± 1,84 µmol TE·g <sup>-1</sup> ss
ORAC	20,04 ± 1,65 µmol TE·g <sup>-1</sup> ss

SD: desviación estándar; FRAP: Capacidad de reducción férrica del plasma;  
ORAC: Capacidad de absorción de radicales de oxígeno.

#### 4.1.3 Caracterización térmica de la papa cruda

En la figura 23, se puede ver el termograma obtenido por DSC para la papa cruda donde se evidencia la transición endotérmica atribuible a la gelatinización del almidón. Se muestran los valores promedio obtenidos para la temperatura de inicio ( $T_i$ ), temperatura pico ( $T_p$ ) y temperatura final ( $T_f$ ) de gelatinización. De la figura 23, se puede decir que la  $T_i$ ,  $T_p$  y  $T_f$  de la papa cruda fueron 56,39; 66,81 y 78,12 °C, respectivamente.

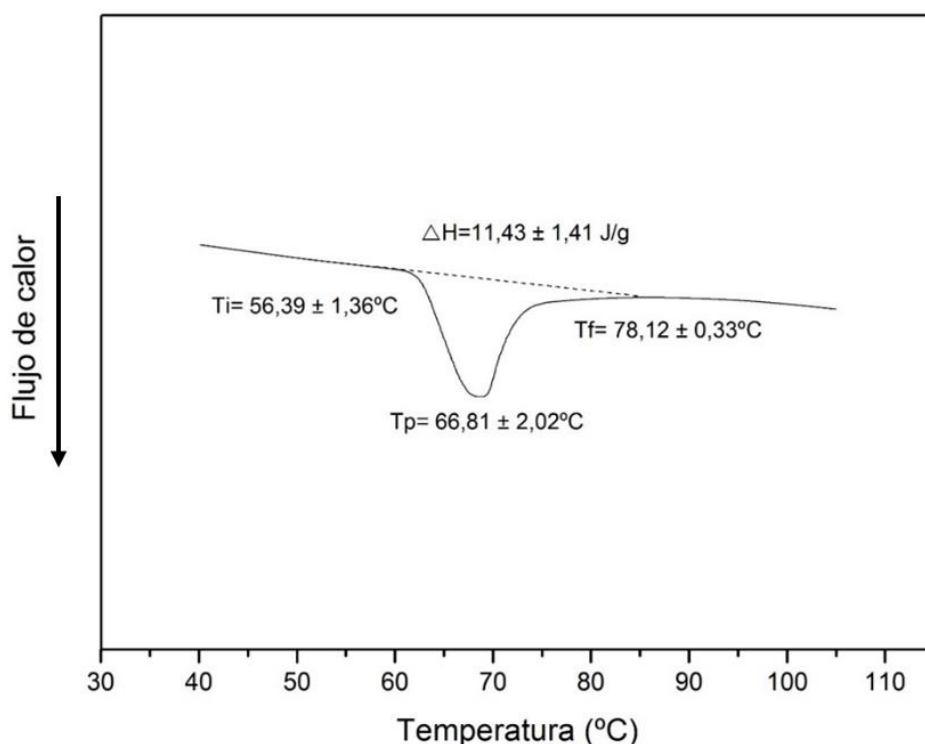


Figura 23. Termograma obtenido por DSC para la papa variedad Diacol Capiro.

Przetaczek-Roznowska, (2017) reportó temperaturas  $T_i = 64,8$ ,  $T_p = 67,2$  y  $T_f = 73,8$  °C para el almidón de papa. De forma general, se reporta que el inicio de la gelatinización de los gránulos de papa ( $T_i$ ) aparece en un intervalo de temperatura de alrededor 59 - 70 °C (Singh & Kaur, 2016) y diversos autores reportan temperaturas pico ( $T_p$ ) entre 64 a 70 °C (Liu, Yada, & Arul, 2002; Przetaczek-Roznowska, 2017; dos Santos et al., 2016; Tian, Chen, et al., 2018; Yassaroh, Woortman, & Loos, 2019). Siendo los valores mostrados en la figura 23, acordes a la literatura.

En cuanto a la entalpía de la transición endotérmica, la materia seca de la papa registró un valor promedio de 11,43 J/g. Por su parte, Liu et al (2002), reportó entalpías de 13-14 J/g para la materia seca de la papa y de 16-18 J/g para el almidón, esto se debe al efecto de los otros componentes en la materia seca de la papa, tales como proteínas, lípidos y minerales.

Según lo anterior, se tiene que, con el proceso de escaldado realizado como pretratamiento a las rodajas de papa antes de la impregnación, el cual se llevó a cabo a 80 °C se garantiza la gelatinización del almidón, la cual, a su vez conduce a un incremento en la tasa de hidrólisis de almidón, haciéndolo más fácilmente disponible para el ataque enzimático durante la digestión (Bordoloi, Singh, et al., 2012), ya que la papa en su estado nativo es resistente a la digestión (Dourado et al., 2019). Lo anterior es importante para el desarrollo de alimentos, dirigidos hacia el consumo humano.

#### 4.1.4 Caracterización microestructural de la papa cruda.

En la figura 24, se muestran las micrográficas obtenidas para la papa cruda (24a,b) y escaldada (24c,d).

En la figura 24a, se observan las células del tejido de la papa conteniendo los gránulos de almidón. Se observaron tamaños para el almidón de papa entre 5 a 60  $\mu\text{m}$ , rango amplio que según Simkova, Lachman, Hamouz, & Vokal, (2013) es característico del almidón de papa. Otros tamaños para el granulo de almidón de papa que se han encontrado y coinciden con los hallados en este trabajo están entre 1-110  $\mu\text{m}$  (E. Kim & Kim, 2015; Singh, McCarthy, et al., 2007; Singh, McCarthy, & Singh, 2006). Además, se puede observar que los gránulos más grandes son elipsoidales, mientras que los gránulos pequeños tienen formas más redondeadas, coincidiendo reportes previos dados por Stasiak, Rusinek, Molenda, Fornal, & Błaszczak, (2011).

En la figura 24c,d, se puede observar que el proceso de escaldado con las condiciones realizadas condujo en algún grado a la gelatinización del almidón, ya que no se observan los

gránulos nativos presentes en la papa cruda (24a,b), lo cual, era de esperarse de acuerdo con la caracterización térmica.

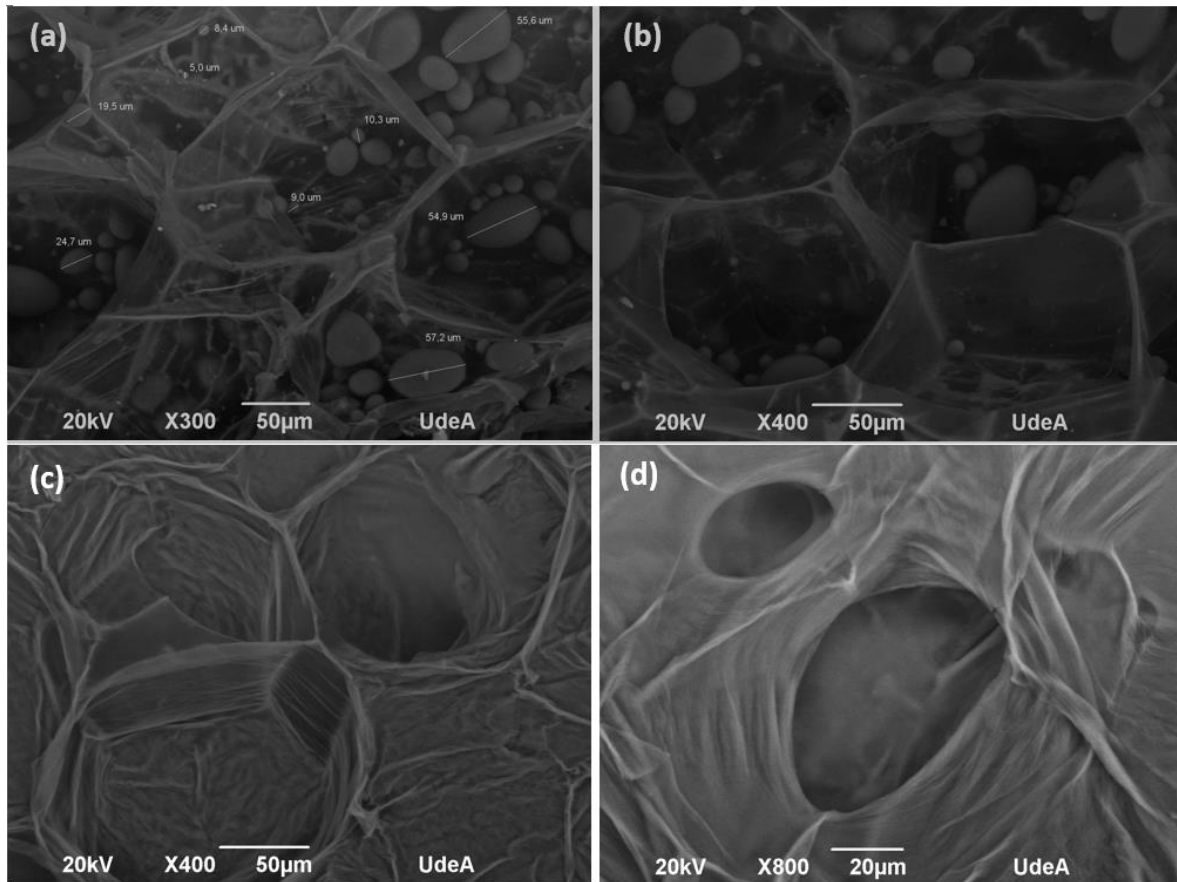


Figura 24. Micrografías obtenidas para la papa cruda (a,b) y escaldada (c,d).

Finalmente, según las micrografías, se observa que después del escaldado, las células del parénquima de la papa conservan del contorno de la pared celular, tal como se ha evidenciado previamente (Ormerod et al., 2002).

#### 4.1.5 Relevancia de los resultados obtenidos

De los resultados del objetivo específico N°1 se podría concluir que la papa variedad Diacol Capiro tiene propiedades fisicoquímicas (porosidad) que la hacen apta para el proceso de fortificación a través de la técnica de impregnación al vacío; así como también deseables propiedades funcionales (capacidad antioxidante) que la hacen propicia para su

transformación industrial. Se resalta además su alto contenido de materia seca, deseable para procesos de deshidratación. Por otro lado, a través de la caracterización microestructural y térmica se pudo evidenciar que el pretratamiento realizado a las rodajas era capaz de destruir la estructura granular, característica importante para disminuir la resistencia al ataque enzimático, con el consecuente aumento de la digestibilidad del almidón.

## 4.2. Etapa 2. Objetivo específico N°2

### 4.2.1 Resultados del diseño de experimentos de Impregnación al vacío con solución isotónica de NaCl

En la figura 25, se pueden observar algunas fotografías durante el proceso de impregnación al vacío (IV) de la papa, con una solución de NaCl 0,8 % de tal forma que fuera isotónica al tubérculo ( $a_w = 0,996$ ). Por su parte, en la tabla 5, se presentan los parámetros de impregnación para las rodajas de papa obtenidos con las diferentes condiciones experimentales realizadas (numeral 3.6.1. Análisis estadístico), mientras que la tabla 6 muestra la tabla ANOVA. Adicionalmente, el anexo 1 presenta las gráficas de Superficie de Respuesta (MSR) para las diferentes variables respuesta analizadas.



Figura 25. Muestras de papa durante el proceso IV.

Tabla 5. Resultados del diseño experimental para el proceso de Impregnación al vacío (IV).

Experimento	Factores			Parámetros de Impregnación				
	VP (kPa)	t <sub>1</sub> (min)	t <sub>2</sub> (min)	X <sub>1</sub> (%)	Y <sub>1</sub> (%)	X (%)	Y (%)	ε <sub>e</sub> (%)
1	64,3	4	4	-9,7 ± 1,9	4,4 ± 3,1	10,0 ± 1,7	1,5 ± 0,6	12,8 ± 2,4
2	50,8	3	5	-5,5 ± 0,3	2,7 ± 0,3	5,7 ± 0,7	1,7 ± 0,5	8,7 ± 0,9
3	50,8	5	5	-4,5 ± 0,3	4,1 ± 0,4	5,4 ± 0,3	2,8 ± 0,6	7,2 ± 0,7
4	64,3	3	4	-8,0 ± 0,5	3,0 ± 2,0	8,7 ± 0,8	-0,9 ± 1,6	13,6 ± 1,3
5	50,8	3	3	-5,0 ± 0,9	3,1 ± 0,4	5,4 ± 0,4	1,4 ± 0,3	8,9 ± 0,8
6	64,3	4	4	-8,7 ± 2,4	1,9 ± 1,0	8,2 ± 0,9	-1,7 ± 0,5	13,8 ± 1,7
7	64,3	4	3	-7,1 ± 1,0	1,8 ± 1,6	6,8 ± 2,0	-0,1 ± 1,7	9,7 ± 1,0
8	77,9	3	3	-10,0 ± 0,5	1,9 ± 1,7	10,1 ± 0,7	0,6 ± 1,9	10,6 ± 1,5
9	77,9	3	5	-9,8 ± 0,9	1,2 ± 0,4	9,6 ± 0,9	-1,0 ± 0,5	11,8 ± 0,9
10	64,3	4	5	-5,8 ± 1,4	2,3 ± 1,2	6,8 ± 1,8	1,4 ± 1,3	7,9 ± 1,2
11	77,9	5	3	-8,0 ± 1,7	1,9 ± 0,4	9,0 ± 1,3	0,3 ± 0,6	9,7 ± 2,0
12	77,9	4	4	-8,1 ± 1,6	1,1 ± 0,7	9,2 ± 0,8	-0,2 ± 2,4	10,4 ± 2,3
13	64,3	5	4	-5,1 ± 1,0	1,9 ± 0,6	6,0 ± 1,0	0,7 ± 0,5	7,8 ± 1,3
14	64,3	4	4	-6,3 ± 1,4	1,4 ± 0,6	7,0 ± 0,9	-1,4 ± 0,9	11,6 ± 1,3
15	77,9	5	5	-7,1 ± 0,9	2,5 ± 1,1	8,5 ± 0,8	1,7 ± 2,0	7,7 ± 1,9
16	50,8	5	3	-5,0 ± 1,0	1,8 ± 0,4	5,1 ± 0,9	-0,4 ± 0,4	10,6 ± 1,1
17	64,3	4	4	-7,7 ± 1,5	0,8 ± 0,3	8,1 ± 0,9	-0,7 ± 0,4	12,0 ± 1,6
18	50,8	4	4	-5,2 ± 0,2	2,2 ± 0,3	5,8 ± 0,4	0,9 ± 0,5	9,7 ± 0,4

VP: Presión de vacío; t<sub>1</sub>: tiempo de vacío; t<sub>2</sub>: tiempo de restauración; X<sub>1</sub>: Fracción volumétrica de impregnación al final de la etapa de vacío; Y<sub>1</sub>: Deformación volumétrica al final de la etapa de vacío; X: Fracción volumétrica de impregnación al final del proceso de impregnación; Y: Deformación volumétrica al final del proceso de impregnación; ε<sub>e</sub>: porosidad efectiva.

- Análisis de X<sub>1</sub> (Fracción volumétrica de impregnación al final de la etapa de vacío)

De la tabla 5, se puede observar que el parámetro X<sub>1</sub> presentó valores negativos, lo cual describe la salida de líquido nativo del interior de la matriz de la papa, estos valores negativos de la fracción volumétrica al final de la etapa de vacío, estuvieron en el rango de -4,5 y -9,8 % para todas las condiciones experimentales utilizadas. Este comportamiento se debe a que al inicio del proceso de impregnación, el vacío promueve la expansión del gas con su subsecuente salida; además, el líquido nativo contenido dentro de la estructura de la papa y el agua absorbida durante el proceso de escaldado también pueden experimentar salida de la estructura debido al vacío aplicado; por lo tanto, los niveles de impregnación obtenidos

se deberán también a la sustitución de líquido nativo por disolución externa (Sanzana, 2010). El mismo comportamiento ha sido evidenciado en la impregnación de otros productos tales como: remolacha, uchuva, zanahoria, apio y hongos comestibles; que presentaron pérdidas de líquido desde el interior del orden de -5 % (Gras et al., 2002), -10 % (Cortés et al., 2015), -11 % (Sanzana, 2010), -14 % (Martelo et al., 2010) y -15 % (Ruíz, 2009), respectivamente.

Tabla 6. ANOVA del diseño experimental para el proceso IV.

	<b>Valor-p</b>				
	$X_1$	$Y_1$	$X$	$Y$	$\epsilon_e$
A: Presión de vacío VP (kPa)	0,029	0,368	0,017	0,352	0,19
B: Tiempo en la etapa de vacío, $t_1$ (min)	0,154	0,949	0,256	0,534	0,04
C: Tiempo de restauración, $t_2$ (min)	0,64	0,674	0,918	0,371	0,131
AA	0,852	0,806	0,93	0,607	0,366
AB	0,434	0,798	0,668	0,507	0,157
AC	0,789	0,677	0,672	0,417	0,391
BB	0,799	0,641	0,921	0,998	0,956
BC	0,718	0,426	0,981	0,238	0,101
CC	0,713	0,918	0,465	0,435	0,05
$R^2$	78,27	45,5	83,15	71,80	70,38
Falta de ajuste	0,716	0,99	0,781	0,977	0,146

$X_1$ : Fracción volumétrica de impregnación al final de la etapa de vacío;  $Y_1$ : Deformación volumétrica al final de la etapa de vacío;  $X$ : Fracción volumétrica de impregnación al final del proceso de impregnación;  $Y$ : Deformación volumétrica al final del proceso de impregnación;  $\epsilon_e$ : porosidad efectiva;  $R^2$ : coeficiente de correlación.

En la Figura 26, se observa la gráfica MSR (26a) y gráfica de efectos principales (26b) para  $X_1$ , donde a mayor presión de vacío (más vacío), mayor era la salida de líquido del interior. Además,  $X_1$  se vio afectada significativamente ( $p < 0,05$ ) por la presión de vacío aplicada durante el proceso, presentándose la mayor salida de líquido a una presión de vacío de 77,9 kPa correspondiente a  $X_1 = -10,0 \pm 0,5$  % (tabla 5). Por otro lado, a pesar de los otros factores  $t_1$  y  $t_2$ , no afectaron significativamente a  $X_1$ , en la gráfica de efectos principales (26b), se observa una tendencia a obtener mayor salida de líquido con el menor tiempo de vacío  $t_1$ . Los resultados anteriores están en concordancia con otras matrices alimentarias, donde el vacío aplicado ha ocasionado salida de líquido nativo, este es el caso de la uchuva (Cortés-Rodríguez, Cabrera, & Ortega-Toro, 2018), manzana (Carpetano, 2011) y papa (Hernández, 2014).



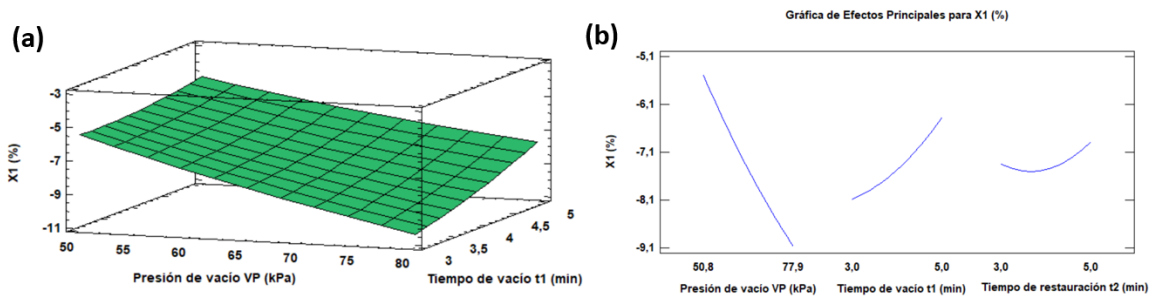


Figura 26. Gráfica MSR (a) y efectos principales para  $X_1$  (b).

- Análisis de  $Y_1$  (Deformación volumétrica al final de la etapa de vacío)

Con los datos descritos anteriormente, es decir, la salida de gas y líquido nativo del interior de la matriz de la papa, se produce un incremento en el volumen de muestra, generando valores positivos de la deformación al final de la etapa de vacío ( $Y_1$ ) (Cortés-Rodríguez, 2004), que en este caso oscilaron entre 0,8 – 4,4 % (tabla 5). Este rango abarca los valores de deformación reportados en la impregnación con solución isotónica de manzana, fresa, pera (Salvatori et al., 1998). El parámetro  $Y_1$ , no fue afectado significativamente, por ninguno de los factores estudiados ( $p > 0,05$ ) (tabla 6), probablemente debido a la rápida cinética de los fenómenos acoplados (mecanismo hidrodinámico con los fenómenos de deformación-relajación) lo cual, en este caso, conduce a una situación de equilibrio en el rango de tiempo estudiado en los experimentos (Salvatori et al., 1998).

- Análisis de X (Fracción volumétrica de impregnación al final del proceso IV)

Para poder establecer la fracción volumétrica al final del proceso (X), se debe restablecer la presión atmosférica en el sistema, con lo cual se genera el ingreso de líquido de impregnación al interior de la matriz, generando valores positivos de la fracción volumétrica al final del proceso IV (X), que para las condiciones experimentales evaluadas estuvieron en el rango de 5,1 – 10,1 %, (tabla 5). En la figura 27, se observa la gráfica MSR (27a) y gráfica de efectos principales (27b) para X, donde, a mayor presión de vacío (más vacío), mayor era el ingreso de líquido al interior, coincidiendo con lo reportado para otras

matrices alimentarias (Martínez-Navarrete et al., 1999). La variable respuesta X, se vio afectada significativamente ( $p < 0,05$ ) por la presión de vacío aplicada durante el proceso (tabla 6), presentándose el mayor ingreso de líquido con una presión de VP=77,9 kPa, que correspondió a  $X = 10,1 \pm 0,7 \%$ . Adicionalmente, se ha reportado que el escaldado realizado como pretratamiento al proceso IV, ayuda a aumentar el ingreso de líquido dentro de la matriz (Nieto et al., 1998; Tiwari et al., 2018), probablemente debido al intercambio de agua con líquido de impregnación (Betoret et al., 2007).

A pesar de que los factores  $t_1$  y  $t_2$ , no afectaron significativamente a X, de acuerdo con la gráfica de efectos principales (27b), se observa una tendencia a obtener mayor ingreso de líquido con el menor tiempo de vacío  $t_1$  y un tiempo medio de restauración  $t_2$ , dentro de los niveles estudiados.

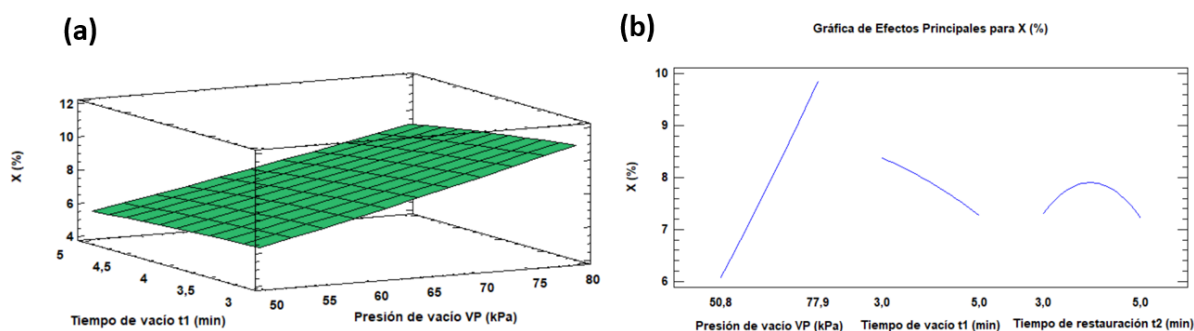


Figura 27. Gráfica MSR (a) y efectos principales para X (b).

- Análisis de Y (Deformación volumétrica al final del proceso IV)

El ingreso del líquido, conduce a cambios estructurales reflejados en el valor de la deformación al final del proceso de impregnación (Y), la cual presentó valores positivos y negativos, asociados a la expansión y contracción de la matriz, respectivamente, encontrándose valores entre -1,7 y 2,8 %, los cuales se pueden ver en la tabla 5. Los valores negativos, representan una contracción asociada con la depresión de los gases presentes en la matriz, ocurriendo principalmente a altas presiones de vacío (VP= 64,3 – 77,9 kPa) (Gras et al., 2002); en tanto que, los resultados positivos, indican que la matriz continuó expandida,

como consecuencia de la liberación inicial del gas y líquido internos (Cortés, 2004; Hernández, 2014). Estos valores bajos de deformación durante el tratamiento IV reflejan la pequeña resistencia que ofrece la matriz al flujo del fluido, lo que conduce a tiempos de impregnación característicos cortos (Salvatori et al., 1998); sin embargo, cabe señalar que la compresión que se presente puede deformar y reducir el tamaño del poro dependiendo de la respuesta mecánica de la matriz (Fito, Chiralt, Barat, Andrés, et al., 2001). El parámetro  $\Upsilon$ , no fue afectado significativamente, por ninguno de los factores estudiados ( $p > 0,05$ ) (tabla 6), probablemente como se mencionó anteriormente a la rápida cinética de los mecanismos involucrados (HDM-DRP). Betalleluz, (2015), señala que la cinética de la ganancia hidrodinámica de la disolución externa en el producto poroso en la segunda etapa del proceso durante el restablecimiento de la presión atmosférica, es rápida comparado con un proceso difusional y está determinada por su viscosidad, además de la porosidad y la tortuosidad de la matriz sólida. Asimismo, Salvatori et al., (1998) no encontraron que la deformación fuera influenciada por los factores evaluados.

Adicionalmente, estos valores bajos de deformaciones reflejan la naturaleza viscoelástica del tejido de la papa (Sanzana, 2010), que le permite responder a los cambios de presión impuestos en el sistema.

- Análisis de  $\varepsilon_e$  (porosidad efectiva)

Finalmente, los valores de porosidad efectiva ( $\varepsilon_e$ ), definida como la fracción del volumen de la muestra disponible para el mecanismo hidrodinámico (HDM), oscilaron entre 7,2 y 13,8 % (tabla 5); estos valores reflejan disponibilidad para la incorporación de la solución de impregnación. La porosidad efectiva presentó diferencias significativas por efecto del tiempo de vacío ( $p < 0,05$ ) (tabla 6). En la figura 28, se muestra la gráfica MSR (28a) y gráfica de efectos principales (28b) para  $\varepsilon_e$ , donde se observa que a menor tiempo de vacío se obtiene mayor porosidad efectiva. Lo anterior se puede explicar, debido al hecho de que la duración del periodo a presión de vacío en este tipo de proceso de IV, tiene que ser el necesario para alcanzar el equilibrio mecánico dentro del producto (igual presión interna y presión externa aplicada) y dado el espesor del mismo (2,5mm) se puede considerar que

este equilibrio se alcanza rápidamente (Betalleluz, 2015). Por lo tanto, el exponerse a un tiempo de vacío superior, podría estar deformando en mayor grado la matriz, con la consecuente obstrucción de los poros, debido a los Fenómenos de Deformación-Relajación ocasionados por los cambios de presión del sistema (Derossi et al., 2012). La rápida cinética de la impregnación al vacío es una importante característica de este mecanismo de transferencia de masa, y según Fito, Chiralt, Barat, Spiess, & Behsnilian, (2001) unos pocos minutos –dependiendo del tamaño y porosidad de la fruta- son suficientes para desgasificar la estructura. En cuanto a los otros factores, por medio de la gráfica de efectos principales (28b) se observa que, a mayor presión de vacío y tiempo medio de restauración, mayor porosidad efectiva.

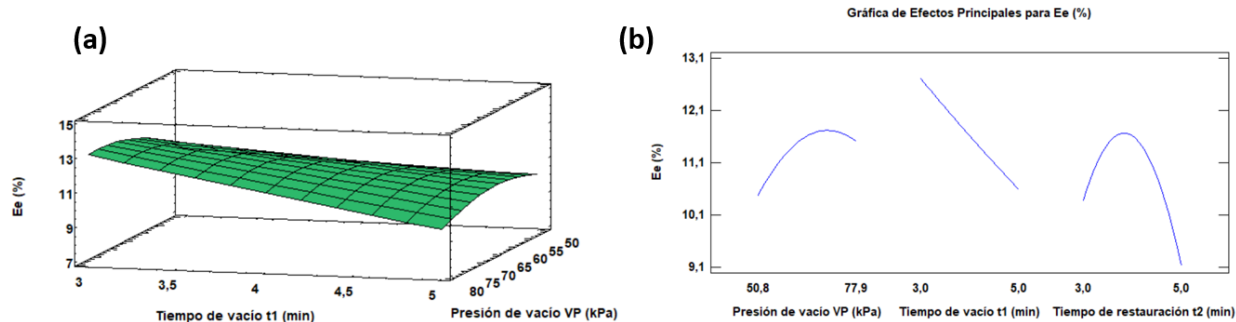


Figura 28. Gráfica MSR (a) y efectos principales para  $\varepsilon_e$  (b).

Los valores obtenidos para la porosidad efectiva, en todos los casos para el diseño experimental, son menores que la porosidad real calculada (14,5 %), indicando que luego del proceso de impregnación, no todo el volumen disponible de la muestra es ocupado por la solución de impregnación. Lo anterior y según Botero, (2008), se debe al efecto de capilaridad, la viscosidad de la solución y las modificaciones estructurales ocasionadas por los cambios de presión en el sistema, ya que este volumen libre no es completamente llenado, coincidiendo por lo señalado por otros autores (Mújica-Paz et al., 2003; Ostos et al., 2012).

La razón entre la porosidad efectiva y la porosidad real ( $\varepsilon_e / \varepsilon_r$ ) representa la parte de la fracción porosa del material utilizable por el mecanismo hidrodinámico (HDM) (Betalleluz, 2015). En este caso, entre el 50 y 95 % de la fracción porosa de este material quedaría llena de líquido de impregnación después de los tratamientos IV. Salvatori et al.,

(1998) obtuvieron para  $(\varepsilon_e / \varepsilon_r)$  un rango entre 59 y 76 % en la impregnación de manzana, mango y fresa con soluciones isotónicas, mientras que Gras et al., (2002) obtuvieron para zucchini, hongos comestibles, remolacha y berenjena valores entre 28 y 300 %. Los valores superiores encontrados en este estudio se pueden atribuir a características propias de la matriz de la papa, a los valores bajos de deformación experimentados por la matriz, al pequeño espesor de las muestras y al pretratamiento de escaldado realizado a las rodajas. Por su parte, valores en la literatura superiores al 100 % representan que la fracción de volumen de la muestra utilizada por el tratamiento IV fue mayor al volumen originalmente ocupado por gas (Gras et al., 2002).

- Análisis de correlaciones

Una vez realizados los análisis de correlación de Pearson (anexo 2), se encontraron correlaciones lineales significativas inversas ( $p < 0,05$ ) entre:  $X_1$  y  $X$ ,  $X_1$  y  $\varepsilon_e$  y finalmente entre  $Y$  y  $\varepsilon_e$ , con valores de -0,916, -0,6647 y -0,7595, respectivamente. Esto implica que la pérdida de líquido nativo en la etapa de vacío era compensada por el flujo de la solución externa (Gras et al., 2002), incrementando la porosidad efectiva a la impregnación y con la menor deformación; resultados esperados, ya que entre más disponibilidad dentro de la matriz, mayor espacio disponible para la incorporación del líquido de impregnación.

Por otro lado, el análisis de correlación arrojó relaciones positivas entre  $Y_1$  y  $Y$  y entre  $X$  y  $\varepsilon_e$ , con valores de 0,7012 y 0,5444, respectivamente. La primera correlación, refiere que mayores valores de deformación al final de la etapa de vacío, conducían a mayores valores de deformación al final del proceso, lo que implica que en el 70 % de los casos, la matriz continuaba deformada como consecuencia de la expansión inicial, como se evidenció anteriormente. Por otro lado, la segunda correlación implica que mayor flujo de líquido hacia la matriz, condujo a obtener mayores valores de porosidad efectiva. Esto es de esperarse debido a que mayor fracción de volumen inicialmente ocupada por gas fue remplazada por líquido de impregnación, como han evidenciado previamente otros autores (Gras et al., 2002; Salvatori et al., 1998).

- Optimización del proceso

Las variables respuesta pudieron ser ajustadas al modelo general (ecuación 13), ya que, de acuerdo con la tabla 6 la falta de ajuste tuvo valores  $p > 0,05$ . En ese sentido, las ecuaciones 14, 15 y 16 muestran el comportamiento de las variables respuesta con  $R^2 > 70$ , esto es, la porosidad efectiva ( $\varepsilon_e$ ) ( $R^2 = 70,38$ ), la fracción volumétrica al final de la etapa de vacío ( $X_1$ ) ( $R^2 = 78,26$ ) y la fracción volumétrica al final del proceso de impregnación ( $X$ ) ( $R^2 = 83,15$ ), respectivamente:

$$\varepsilon_e = -45,63 + 4,86 \times B - 1,86 \times C^2 \quad \dots(14)$$

$$X_1 = 24,86 - 0,44 \times A \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$X = -16,69 + 0,21 \times A \quad \dots\dots\dots(16)$$

donde A es la presión de vacío, B el tiempo en la etapa de vacío y C el tiempo en la etapa de presión atmosférica. Con respecto a las variables respuesta con  $R^2 < 70$ , a pesar de que se cumplió la bondad de ajuste y éstas se ajustan a un modelo cuadrático, no dan suficiente explicación para el comportamiento de la variable, probablemente debido a que los niveles de los factores estudiados estuvieron muy cercanos, por lo que el efecto sobre la variable respuesta al cambiar de un nivel a otro es pequeño (Gutiérrez-Pulido, 2012).

Finalmente, teniendo en cuenta los modelos ajustados para cada respuesta, se procedió a realizar el método de optimización conjunta utilizando la función de deseabilidad. Para esto, se tomaron las variables respuesta con  $R^2 > 70\%$  y el criterio (maximizar, minimizar o mantener fijo) buscaba impregnar la mayor cantidad de líquido, esto es X máxima,  $X_1$  mínima y  $\varepsilon_e$  máxima, mientras que la deformación se mantuvo constante con un valor de 0,5. Adicionalmente, se establecieron los *impactos* (1,0-5,0) con base en la importancia de las variables respuesta en el proceso IV, donde, se asignó el valor de 5 al parámetro X (más importante) y el valor de 1 al parámetro Y (menos importante); y se fijaron los *pesos* (0,1-10,0) de cada una de ellas, de acuerdo a la permisibilidad de que la variable respuesta se distancie del criterio establecido, donde se asignó 0,5 a la variable Y (más permisible) (STATGRAPHICS, 2006; StatPoint Technologies Inc., 2010). Estos criterios

establecidos están dirigidos principalmente a buscar una mayor transferencia de masa del líquido de impregnación hacia el interior.

De esta forma, se llegó a la combinación de factores que alcanza la deseabilidad global óptima, potenciando las variables respuesta, con una deseabilidad de 0,89; esto es, presión de vacío (PV) 77,3 kPa, tiempo de vacío ( $t_1$ ) 3,0 min y tiempo de restauración ( $t_2$ ) 4,0 min. Adicionalmente, la deseabilidad evaluada en cada punto de diseño puede ser observada en el anexo 3.

Con la condición óptima de factores obtenida, se procedió a realizar un nuevo experimento de impregnación, por triplicado. La tabla 7 muestra los parámetros obtenidos experimentalmente, que están acorde con los parámetros estimados por el modelo, por lo que estas condiciones se utilizaron posteriormente para el proceso de fortificación mediante impregnación al vacío.

Tabla 7. Parámetros estimados y experimentales obtenidos con las condiciones óptimas de impregnación.

	$X_1$ (%)	X (%)	$\Upsilon$ (%)	$\epsilon_e$ (%)
Parámetros estimados por el modelo	-10,04	10,42	-1,09	13,26
Parámetros experimentales	$-11,14 \pm 2,96$	$11,57 \pm 2,65$	$1,06 \pm 3,01$	$11,89 \pm 1,02$

$X_1$ : Fracción volumétrica de impregnación al final de la etapa de vacío; X: Fracción volumétrica de impregnación al final del proceso de impregnación;  $\Upsilon$ : Deformación volumétrica al final del proceso de impregnación;  $\epsilon_e$ : porosidad efectiva.

#### 4.2.2 Impregnación al vacío con emulsión de fortificación

El valor obtenido de X con la solución isotónica, resultante del proceso de optimización (tabla 7), se utilizó como base para determinar la concentración de compuestos activos a adicionar en la emulsión de impregnación. Para esto, se utilizaron las ecuaciones 5 y 6, con el fin de alcanzar mínimo el 10 % VDR calcio (100 mg de Ca), 100 % VRD vitamina C (60 mg de VitC) y 100 % VDR vitamina E (20 mg de VitE) en 100 g de papa fresca. Se partió de valores teóricos de calcio  $x_{Calcio}^0 = 0,0001$  que corresponde a 10 mg Calcio·100 g

$^{-1}$  de papa fresca; vitamina C  $x_{vitamina\ C}^0 = 0,00006$  que corresponde a 6 mg vitamina C · 100 g $^{-1}$  de papa fresca y vitamina E  $x_{vitamina\ E}^0 = 0$  mg vitamina E · 100 g $^{-1}$  de papa fresca. De esta forma, se obtuvo que la composición de cada componente en la emulsión de impregnación debía ser  $Y^{Calcio}(\%) = 0,9$ ;  $Y^{vitamina\ C}(\%) = 0,6$  y  $Y^{vitamina\ E}(\%) = 0,2$

Estos CFA fueron emulsionados en una fase acuosa isotónica (solución de NaCl 0,8 %) para lo cual se utilizaron dos tensoactivos, Tween 80 (0,051 %) y Span 60 (0,049 %) (Botero, 2008; Cortés, 2004). La figura 29 muestra la emulsión de fortificación resultante.



Figura 29. Emulsión de fortificación realizada.

#### 4.2.3 Caracterización de la emulsión de fortificación

El valor obtenido para la viscosidad aparente de la emulsión de impregnación fue de 1,887 mPa·s. De acuerdo con Betalleluz, (2015), los valores de viscosidad menores de 10 mPa·s no afectan el proceso de impregnación, por lo tanto, el valor obtenido contribuye a una rápida cinética de impregnación. En cuanto al tamaño de partícula, la figura 30 muestra el resultado obtenido para la emulsión de impregnación por intensidad (30a) y por volumen (30b). Ésta presentó una distribución de tamaño de partícula monomodal con un diámetro promedio de 234,9 nm y tamaños de partícula entre 137,9 y 331,9 nm. Además, el índice de polidispersabilidad (Pdl) fue de 0,170, lo que implica un valor adecuado para este parámetro, ya que valores superiores a 0,4 involucran una elevada polidispersabilidad que podrían afectar el proceso de impregnación (Moreno Rodríguez, 2011).



Estos valores a nanoescala (<500 nm) (Cardoso & Jiménez, 2015), representan una ventaja en el proceso de impregnación, ya que contribuyen a una mayor incorporación debido al hecho de que los bloqueos que pueden ser generados por las partículas más grandes se podrían evitar (Derossi et al., 2012).

Debido a que tanto la viscosidad como el tamaño de partícula cumplieron con características deseables para asegurar una buena impregnación, se procedió a realizar la fortificación de las rodajas de papa.

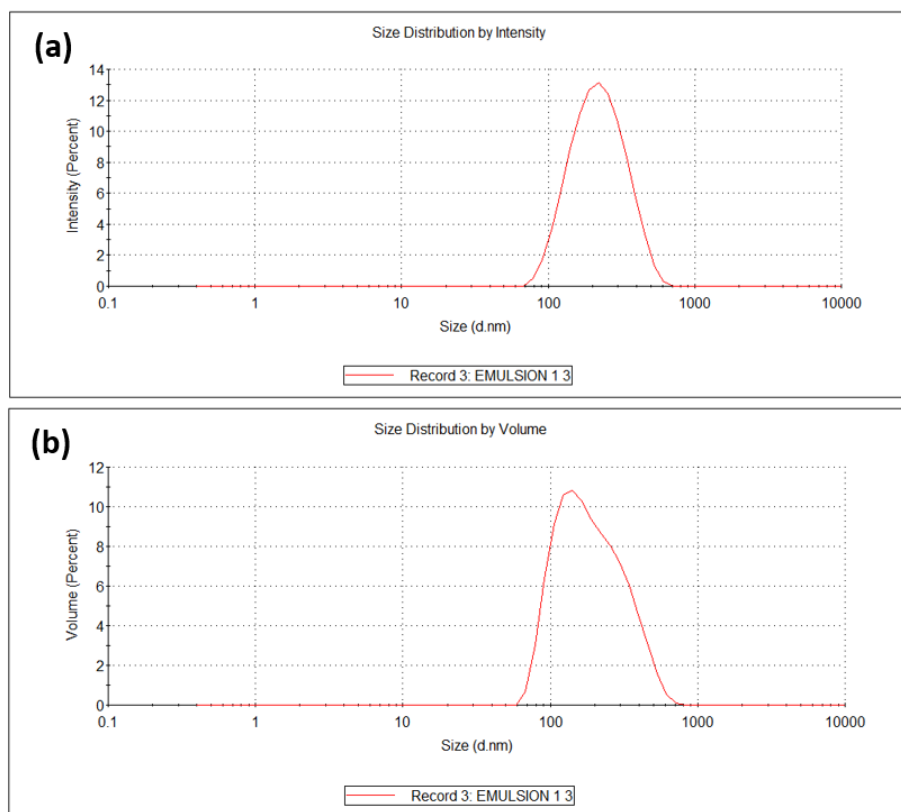


Figura 30. Distribución de tamaño de partícula de la emulsión de impregnación por intensidad (a) y por volumen (b).

#### 4.2.4 Fortificación de las rodajas de papa

La figura 31, presenta el sistema utilizado para realizar la fortificación de las rodajas de papa con las condiciones óptimas de impregnación determinadas en la sección 4.2.1, esto es,  $PV=77,3$  kPa,  $t_1= 3,0$  min y  $t_2= 4,0$  min.

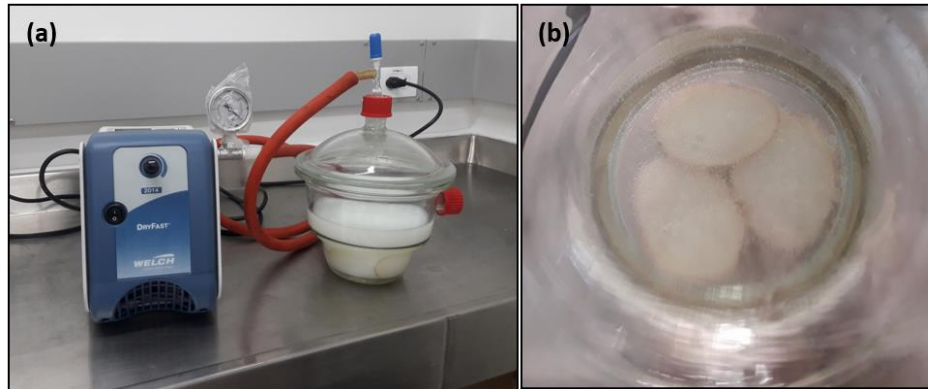


Figura 31. Sistema de impregnación al vacío con la emulsión de fortificación.

Luego de la impregnación, se alcanzó el 22 % de VDR calcio ( $229,50 \pm 12,03$  mg), el 187 % VRD vitamina C ( $113,47 \pm 1,37$  mg) y el 43 % VDR vitamina E ( $8,62 \pm 0,22$  mg) en 100 g de papa fresca. Esto, en base seca equivale a  $35,92 \pm 0,92$  mg vitamina E,  $472,79 \pm 1,37$  mg vitamina C y  $956,87 \pm 14,21$  mg calcio en 100 g (ss).

El hecho de que no se haya alcanzado el valor mínimo fijado para la fortificación con la vitamina E (100 % VDR), se debe a diferencias en los niveles de impregnación, que a su vez pudieron originarse por diversos factores; Barrera Puigdollers, (2007) establece que cuando la concentración de calcio presente en la solución/emulsión de impregnación sobrepasa determinado nivel, la capacidad de impregnación de las muestras disminuye. En efecto, la habilidad del calcio para unirse con las pectinas existentes en la lámina media de los tejidos vegetales provoca un aumento en la rigidez de la pared y dado el acoplamiento existente entre el mecanismo hidrodinámico y los fenómenos de deformación-relajación de la matriz sólida del alimento, una modificación en las propiedades elásticas de la estructura implica diferencias en el nivel de impregnación (Barrera Puigdollers, 2007).

Por otro lado, según Ruíz (2009) un factor importante en los cambios microestructurales lo representa la velocidad de salida de los fluidos en la etapa de vacío y la velocidad del ingreso del líquido de impregnación, que podrían conducir a que en el proceso de relajación del tejido ocurriera pérdida del líquido de impregnación. También, el calcio puede precipitar en la entrada de los poros bloqueando el ingreso de los demás CFA (Castagnini, 2015). Sin embargo, no se puede descartar que se haya producido degradación de la vitamina E durante el procesamiento.

Otros estudios realizados en la papa, alcanzaron niveles de impregnación de 150 mg de vitamina C (Hironaka et al., 2011), 727,18 mg de calcio y 256,78 mg de zinc (Joshi et al., 2016) en 100 g de papa (bh). Se destaca que en la mayoría de los estudios se reporta alta variabilidad en la impregnación, por ejemplo el ácido ascórbico estuvo en el rango entre 110 -190 mg en 100 g papa (bh) (Hironaka et al., 2011). Según Ruíz, (2009) esta variabilidad indica que la respuesta a la IV está afectada grandemente por las condiciones de sistema de producción (sustrato, humedad relativa, temperaturas, frecuencia de riego etc.). Por otra parte, otras investigaciones han mostrado que propiedades de la solución de impregnación como la viscosidad pueden afectar el nivel de infiltración, presentando dificultades cuando se trabaja con soluciones muy viscosas, debido a una incompleta impregnación de los poros del producto (Betalleluz, 2015; Sanzana, 2010). Adicionalmente, cuando el líquido de impregnación es una emulsión, el tamaño de partícula también es un factor importante, ya que menor tamaño de partícula supone una ventaja para alcanzar mayor impregnación (Castagnini, 2015).

#### 4.2.5 Deshidratación de las rodajas de papa fortificadas

La figura 32 muestra los chips de papa deshidratados y fortificados obtenidos con los diferentes métodos: secado por microondas al vacío (MVD) (a), secado por aire caliente (HAD) (b) y secado por liofilización (FD) (c).

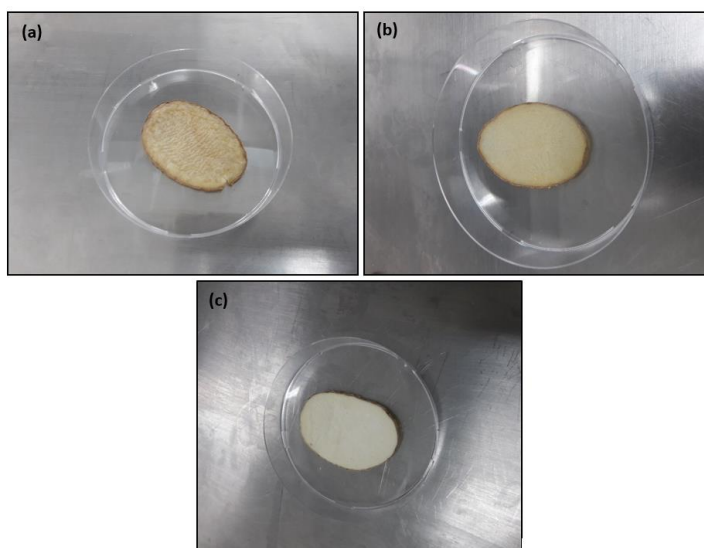


Figura 32. Chips fortificados y deshidratados mediante secado por microondas al vacío (MVD)(a), secado por aire caliente (HAD)(b) y secado por liofilización (FD)(c).

La tabla 8, muestra los valores de humedad y actividad de agua obtenidos por los diferentes métodos de secado, para la papa fresca y para la papa impregnada. El proceso de impregnación causó la disminución en 1 % de la humedad del producto, debido a la ganancia de solutos; mientras que el parámetro de  $a_w$  no presentó ningún cambio. Resultados similares han sido encontrados tras la impregnación de plátano (René et al., 2016) y hongos comestibles (Cortés, García, & Suárez, 2007).

En general, para todos los procesos de deshidratación, el contenido de humedad de las muestras disminuyó, siendo el menor valor el del proceso de liofilización con un 3,09 %. Adicionalmente, con este método se alcanzó la menor  $a_w$  (0,176), garantizando mayor estabilidad; mientras que los productos deshidratados por microondas al vacío y por aire caliente presentaron valores de 0,444 y 0,561, respectivamente, rango en el cual podrían ocurrir reacciones enzimáticas, reacciones hidrolíticas y de oxidación; sin embargo, debido a que las enzimas fueron inactivadas durante el proceso de escaldado y a la poca cantidad de grasa que posee la papa (tabla 3), es poco probable que ocurran estos fenómenos, resultando entonces en productos deshidratados con buena estabilidad (Barbosa-Cánovas et al., 2007).

*Tabla 8. Humedad y actividad de agua de la papa fresca, impregnada y deshidratada con los diferentes métodos.*

	<b>Actividad de agua (<math>a_w</math>)</b>	<b>Humedad (%)</b>
Papa Fresca (FP)	0,996 ± 0,000a	77,07 ± 0,81d
Papa Impregnada (IP)	0,996 ± 0,002a	76,02 ± 0,27d
IP + Secado por aire caliente (HAD)	0,561 ± 0,016d	5,43 ± 0,31b
IP + Secado por liofilización (FD)	0,176 ± 0,004b	3,09 ± 0,53a
IP + Secado por microondas al vacío (MVD)	0,444 ± 0,006c	6,49 ± 0,67c

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) ( $n=3$ ).

Por otro lado, la figura 33 muestra los resultados obtenidos para el contenido de calcio, vitamina C y vitamina E, en la papa fresca (FP), la papa impregnada (IP) y las papas deshidratadas con los diferentes métodos utilizados, expresados en base seca. Como se mencionó anteriormente, el proceso de impregnación condujo a obtener 35,92 ± 0,92 mg de vitamina E, 472,79 ± 1,37 mg de vitamina C y 956,87 ± 14,21 mg de calcio en 100 g (ss).

Adicionalmente, el anexo 4 muestra las tablas ANOVA, Prueba de Múltiples Rangos y Gráfico de Medias para los compuestos fortificantes en papa fresca (FP), papa impregnada (IP), papa fortificada y deshidratada por aire caliente (IP + HAD), papa fortificada y deshidratada por liofilización (IP + FD) y papa deshidratada y fortificada por microondas al vacío (IP + MVD).

En general, después de los procesos de deshidratación, el contenido de vitamina E se redujo en 8 %, 63 % y 67 % para la papa FD, MVD, y HAD, respectivamente. En cuanto a la vitamina C esta reducción fue de 9 %, 33 % y 38 % para FD, MVD, y HAD, respectivamente. Estas reducciones obedecen a la naturaleza termolábil de estas vitaminas (Badui, 2006; Bartosz, 2014), frente al comportamiento del calcio, que tuvo un menor porcentaje de reducción: 9 %, 9 % y 29 % para FD, MVD, y HAD, respectivamente. A pesar de que con los tres procesos de deshidratación se logró mantener parte de los compuestos adicionados, la mayor conservación se alcanzó con FD, seguida del MVD; mientras que el HAD condujo a la mayor pérdida de compuestos, atribuible en parte a la larga duración del proceso. Las ventajas del uso de la liofilización para obtener productos de mayor calidad, resultan de las bajas temperaturas usadas durante el proceso de sublimación y del mantenimiento de la estructura del producto (Ramírez Navas, 2006).

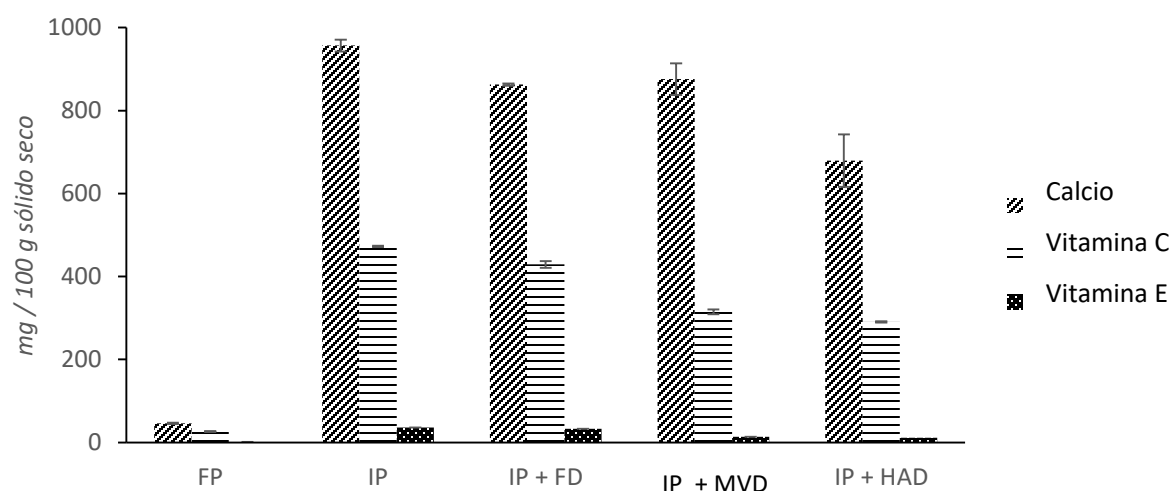


Figura 33. Contenido de calcio, vitamina C y vitamina E en papa fresca (FP), papa impregnada (IP) y papa deshidratada mediante liofilización (FD), microondas al vacío (MVD) y secado por aire caliente (HAD).

Con respecto al análisis de varianza, los procesos de secado FD y MVD no influyeron significativamente sobre el contenido de calcio. Sin embargo, el contenido de vitaminas C y E si fue significativamente menor en MVD que en FD. Mayor retención de vitamina C con FD también fue evidenciada en el secado de fresa (Kowalska et al., 2018) y papa dulce (Yang et al., 2010). Sin embargo, una ventaja del MVD sobre el FD es que se realiza en tiempos más cortos y con menos gasto de energía que FD (Huang et al., 2011); Wang et al., (2010) deshidrataron rodajas de papa mediante liofilización convencional y con microondas, encontrando que no hubo pérdida significativa de vitamina C en ambos procesos y que con el uso del microondas se pudo reducir el tiempo total de secado, debido al calentamiento volumétrico del alimento.

Finalmente, el proceso de secado por aire caliente HAD, condujo a obtener la menor retención de calcio, vitamina E y vitamina C, presentando diferencias estadísticamente significativas con los procesos de FD y MVD ( $p < 0,05$ ), probablemente debido a la larga duración del proceso HAD (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 2000), ya que según McMinn & Magee, (1997) el ácido ascórbico se ve más afectado por un mayor tiempo de procesamiento que una temperatura de procesamiento elevada. Otros alimentos que han evidenciado mayor retención de vitamina C con MVD que HAD son soja (Hu & Zhang, 2006) y zanahoria (Zhang et al., 2006).

Según lo anterior, el MVD es una alternativa de procesamiento que se puede aplicar posterior a la impregnación y que logra mantener en buena proporción los compuestos adicionados, y además proporciona más rápida transferencia de calor que FD o HAD (Setiady et al., 2007).

#### 4.2.6 Análisis microestructural de los chips de papa fortificados

En la figura 34, se muestran las micrográficas obtenidas para la papa fortificada y deshidratada mediante los tres métodos utilizados: FD (34a-c) MVD (34d-f) y HAD (34g-i). En todos los casos, el calentamiento causó estrés en el material celular, que junto con la pérdida de agua conducen a la formación de poros, por lo que la porosidad aumenta con la

eliminación de humedad, esto se puede observar en las micrografías (34b, e, y h) (Singh et al., 2015).

Las micrografías muestran las diferencias aparentes entre las muestras después de los diferentes tratamientos de secado; se observa que los tres métodos de secado generaron algunos cambios en la porosidad en la papa deshidratada, (34a,b), (34d,e) y (34g,h), para los procesos de FD, MVD y HAD, respectivamente.

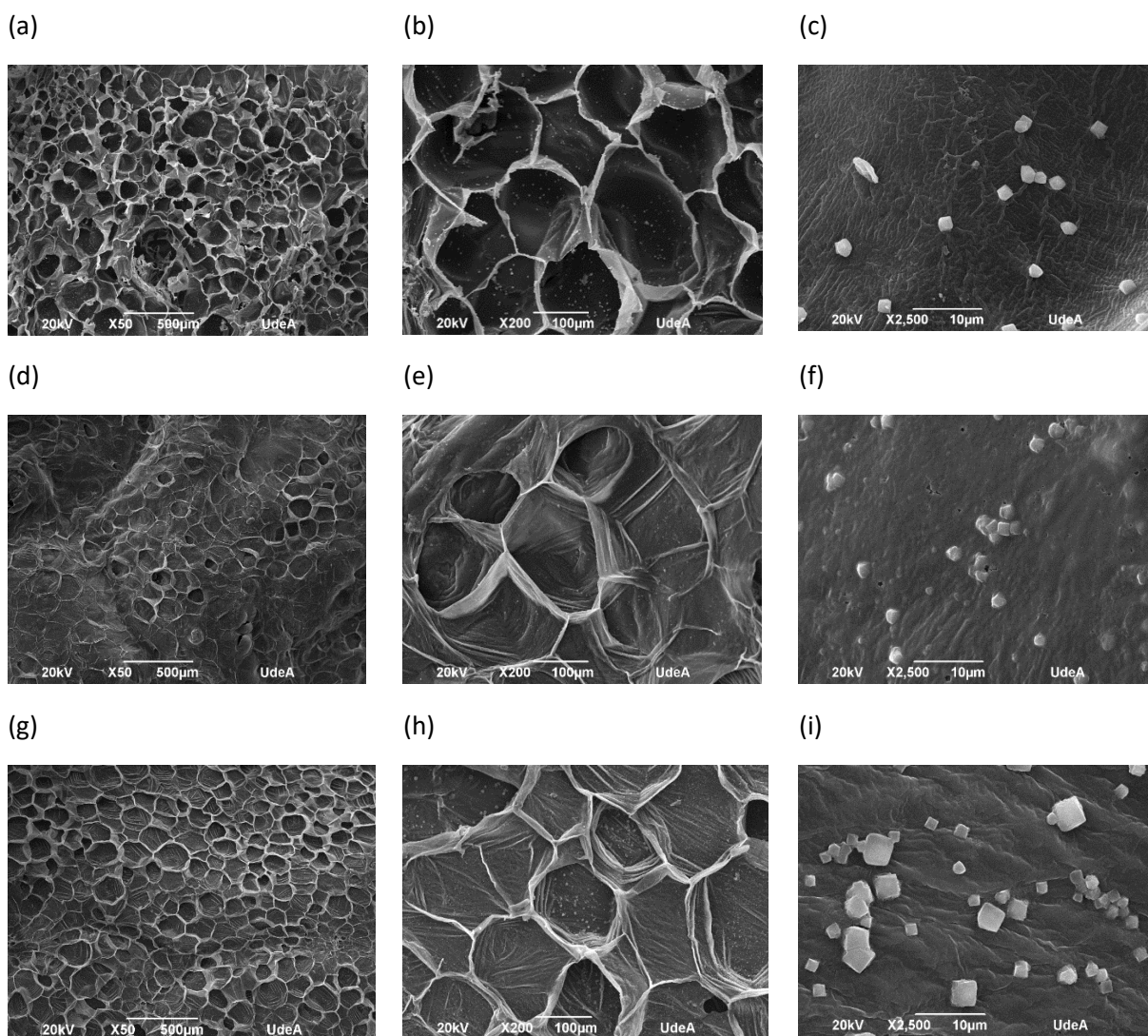


Figura 34. Micrografías SEM para las papas impregnadas y deshidratadas obtenidas por liofilización (FD) (a-c), microondas al vacío (MVD) (d-f) y secado por aire caliente (HAD) (g-i).

De acuerdo a las micrografías, se puede decir que las papas obtenidas por FD, tienen una mayor porosidad que las papas procesadas por MVD y HAD. Comportamientos similares

han sido reportados en papas de la variedad Russet, sometidas a procesos de deshidratación por liofilización, microondas al vacío y por método convectivo (Setiady, Tang, et al., 2009). El anterior comportamiento, se puede deber a que en el proceso FD los cristales de hielo formados en la congelación, se transforman en poros después de la sublimación (Ramírez Navas, 2006), generando el producto con mayor porosidad. Adicionalmente, se observa que las micrografías para las papas FD indican mayor ruptura en las paredes celulares (34b), esto también pudo ser causado por el proceso de congelación, que produce mayor daño sobre los tejidos previamente sometidos a escaldado, como en este caso (Duarte et al., 2017; Wang et al., 2010).

Por su parte, las micrografías de MVD exhiben signos de expansión celular (34e), característico en los productos secados mediante este proceso. Este efecto, llamado *puffing*, fue previamente evidenciado en el secado de fresas (Gaukel, Siebert, & Erle, 2016), manzanas (Sham, Scaman, & Durance, 2001), tomates, zanahorias (Schubert et al., 2005), guisantes verdes (Zielinska et al., 2013) y pescado (Zhang et al., 2007) y ocurre cuando la velocidad de evaporación dentro del producto es más alta que la velocidad de transporte de vapor hacia el exterior del producto; la sobrepresión resultante conduce a una expansión del producto que resulta en una mayor retención de volumen del producto final (Gaukel et al., 2016). Las muestras secadas por aire caliente (HAD) se observan densas y colapsadas (34g,h). Sin embargo, en todos los métodos de deshidratación, la papa retuvo el contorno de la pared celular como evidenciaron previamente Bordoloi, Kaur, & Singh, (2012). Finalmente, en las micrografías (34c,f,i) el análisis elemental permitió evidenciar la presencia del calcio incorporado, el cual, se observa como cristales sobre la superficie del tejido (Mimouni et al., 2007).

#### 4.2.7 Análisis sensorial multidimensional de los chips de papa fortificados

La figura 35, muestra los descriptores encontrados para la textura (35a), olor (35b) y sabor (35c) para los chips de papa fortificados y deshidratados con los diferentes métodos. Adicionalmente, fueron evaluados en cuanto a su calidad general, así: HAD: 1 (*baja*); FD: 2 (*media*) y MVD: 3 (*alta*). El menor puntaje otorgado a las HAD, se debió principalmente a



parámetros relacionados con su textura, que fue evaluada por los jueces como *dura*, *seca* y *fibrosa*, siendo semejante a la textura de una pasta cruda.

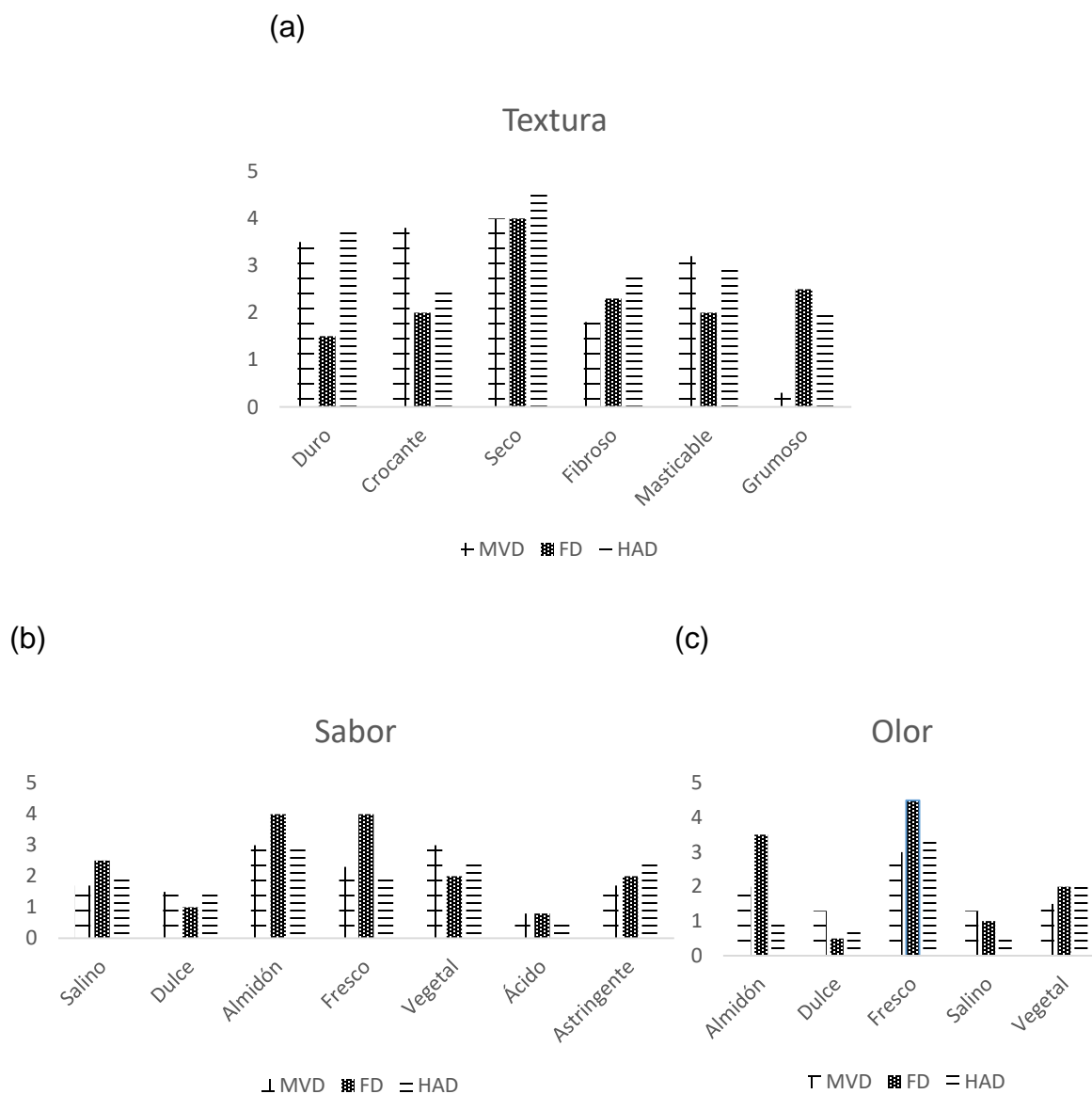


Figura 35. Resultados del análisis sensorial por aproximación multidimensional para textura (a), sabor (b) y olor (c) para los chips obtenidos mediante secado por aire caliente (HAD), liofilización (FD) y microondas (MVD).

Por su parte, las papas FD aunque presentaron mejor evaluación textural, su puntaje de calidad *media*, se debió a que poseían un color claro poco apetecible y un marcado sabor y olor a *almidón*, que pudo ser debido a que con este método de deshidratación se alcanzó la menor humedad en el producto, acentuando su componente amiláceo (Singh & Kaur, 2016);

además, se encontraron descriptores de sabor y olor *salino*, los cuales pueden ser atribuibles a la adición de NaCl a la solución isotónica. Otro descriptor encontrado en los chips de papa fue el *ácido*, el cual se debe a la adición de ácido ascórbico en la emulsión de fortificación. Se destaca el atributo *fresco* en términos de olor y sabor, el cual es una característica sensorial importante para el producto y fue evidenciado en los chips de papa obtenidos por los diferentes métodos utilizados.

Finalmente, las papas MVD presentaron un buen equilibrio en cuanto a sus descriptores, por lo que fueron categorizadas como calidad *alta*. Presentaron la textura menos *seca, fibrosa y grumosa* y a su vez la más *crocante y masticable*. El sabor y olor a *almidón* no fue tan marcado como en FD y sin embargo se percibió el descriptor *vegetal*.

En cuanto a resultados para el análisis sensorial de papas deshidratadas por diferentes métodos, Setiady, Rasco, et al., (2009) encontraron que al comparar papas deshidratadas por liofilización, microondas y secado convectivo, los jueces no encontraron diferencias significativas en la preferencia entre los tres métodos, sin embargo los jueces marcaron una tendencia a preferir las papas procesadas por MVD. Por su parte, Joshi et al., (2016), lograron concluir que el procesamiento por microondas fue adecuado para producir chips de papa con aceptable calidad sensorial y textural, obteniendo puntajes de 7,6 y 8,0, respectivamente, en una escala hedónica de 9,0. Adicionalmente Huang et al., (2011), utilizaron varios métodos de secado para producir chips de papa con manzana y reportaron que los producidos por microondas al vacío tuvieron un puntaje alto demostrando la aceptabilidad del consumidor.

#### 4.2.8 Relevancia de los resultados obtenidos

Se destaca que las condiciones óptimas encontradas para la impregnación al vacío son:  $PV=77,3$  kPa,  $t_1= 3,0$  min y  $t_2= 4,0$  min; para asegurar la mayor incorporación de compuestos activos en la matriz de la papa. Estas condiciones pueden ser utilizadas en estudios posteriores de fortificación de papa usando la técnica de impregnación al vacío, con el fin de obtener un producto de papa mínimamente procesada y fortificada; o si se desean

productos con mayor vida útil pueden someterse posteriormente a otros procesos tecnológicos como es el caso del secado.

Con los resultados descritos con anterioridad, se pudo determinar que las papas obtenidas por HAD, tuvieron los menores porcentajes de retención de los compuestos fortificantes adicionados, así como la menor calidad sensorial. Por su parte, las papas FD a pesar de que presentaron la mayor retención de los compuestos, la calidad sensorial fue evaluada como *media*.

Por el contrario, la *alta* calidad sensorial de los chips obtenidos mediante microondas al vacío, los porcentajes de retención de los compuestos adicionados, los cortos tiempos de proceso y la microestructura porosa y textura crocante, presentan el MVD como un método promisorio para la generación de valor agregado a la papa, por lo que se hace necesario evaluar condiciones de procesamiento que optimicen la calidad de los productos obtenidos; todo lo anterior soportado con los resultados descritos en los análisis microestructural y sensorial, además de la cantidad de compuestos fortificantes y de los valores asociados a la humedad y actividad de agua; los cuales hacen de este proceso ideal para continuar con la investigación, buscando determinar las mejores condiciones de procesamiento.

### **4.3. Etapa 3. Objetivo específico N°3**

#### 4.3.1 Fortificación con las condiciones óptimas de impregnación

Antes de optimizar el proceso de secado por microondas al vacío, se realizaron nuevamente impregnaciones según las condiciones descritas en los resultados anteriores, una vez hecho este proceso, las rodajas de papa alcanzaron niveles de  $854,4 \pm 2,5$  mg de Ca·100 g<sup>-1</sup> ss,  $472,8 \pm 1,4$  mg de VitC·100 g<sup>-1</sup> ss y  $47,0 \pm 7,9$  mg de VitE·100 g<sup>-1</sup> ss. Con respecto a los resultados obtenidos anteriormente, la diferencia de los resultados no supera el 10 %, lo cual habla de la optimización del proceso.

Sin embargo, se podría decir que las diferencias en los niveles de impregnación de calcio y vitamina E, respecto a la figura 33, numeral 4.2.5, pueden deberse a factores relacionados con la materia prima y el proceso mismo de impregnación; tales como variabilidad de la materia prima, porosidad y tortuosidad. No obstante, las diferencias también podrían ser explicadas en términos de las pérdidas de una parte de fase líquida interna debido al colapso de las muestras, que promueve la expulsión de líquido no compartimentado en el tejido que contiene iones de calcio, entre otros sólidos solubles (Torres et al., 2008).

Finalmente, cabe anotar que el período de relajación de la estructura cumple un papel importante tras el proceso de impregnación, ya que puede ocasionar liberación de compuestos hacia el exterior (Ruíz, 2009). A pesar de esto, los valores obtenidos para los compuestos adicionados que fueron superiores a los encontrados en la papa cruda, muestran la viabilidad de la técnica.

#### 4.3.2 Resultados del diseño de experimentos del proceso de secado por microondas al vacío

Las tablas 9 y 10, muestran los resultados obtenidos con las diferentes condiciones experimentales realizadas (numeral 3.6.2 Análisis estadístico), mientras que la tabla 11 muestra la ANOVA. Adicionalmente, el anexo 5 presenta las gráficas de Superficie de Respuesta (MSR) para las diferentes variables respuesta analizadas.

- Análisis de humedad y actividad de agua

Los valores de humedad obtenidos para las papas deshidratadas por MVD estuvieron en el rango entre 2,56 y 8,86 % (tabla 9), siendo superior a los valores reportados para chips de papa obtenidos por fritura convencional, donde la humedad es generalmente de 2 % (Pedreschi et al., 2018), aunque se han reportado valores superiores de humedad de papa, entre 4,6 y 33,4 % (Trujillo-Agudelo et al., 2019) y del 6 % (Huang et al., 2011). La variación en los datos de humedad se pueden deber al espesor de la papa y a la ubicación de las rodajas

dentro del horno microondas, lo que podría conducir a un calentamiento no uniforme (Kingcam, Devahastin, & Chiewchan, 2008; Schubert & Regier, 2005).

Con respecto a la actividad de agua, este parámetro osciló entre 0,110 a 0,524, (tabla 9). Este rango de actividad de agua cubre un rango de actividad enzimática donde podrían ocurrir reacciones hidrolíticas y de oxidación; sin embargo, dado que las enzimas fueron inactivadas durante el proceso de escaldado y debido al bajo contenido de grasa que tiene la papa (tabla 3), es poco probable que ocurran estos fenómenos, resultando en productos con buena estabilidad (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003). A pesar de que ni la humedad ni la actividad de agua se vieron afectadas significativamente por efecto de ninguno de los factores estudiados ( $p > 0,05$ ) (tabla 11), se encontró una correlación positiva significativa (0,9101) entre estas dos variables respuesta (anexo 6). Esto se debe a que la remoción directa del agua por la deshidratación, causa a su vez la reducción de la actividad de agua de un alimento (Barreiro & Sandoval, 2006).

Tabla 9. Resultados del diseño experimental para el proceso de secado por microondas al vacío (MVD) (I).

Exp	Densidad de potencia (PD)(W/g)	Presión Absoluta (AP)(kPa)	Humedad (%)	$a_w$	Tiempo de secado (min)	Vitamina E (mg·100 g <sup>-1</sup> ss)	Vitamina C (mg·100 g <sup>-1</sup> ss)	Calcio (mg·100 g <sup>-1</sup> ss)
1	1,4	7	4,50 ± 0,03	0,253 ± 0,003	21 ± 1	33,81 ± 7,37	295,13 ± 18,09	829,33 ± 1,85
2	1,4	7	6,91 ± 0,19	0,414 ± 0,003	21 ± 1	33,47 ± 1,84	293,75 ± 3,72	807,54 ± 0,38
3	1,1	4	7,13 ± 0,11	0,431 ± 0,003	28 ± 1	32,29 ± 3,49	209,20 ± 5,23	866,84 ± 3,92
4	1,4	4	7,79 ± 0,02	0,480 ± 0,001	20 ± 1	32,68 ± 1,24	236,90 ± 14,63	780,63 ± 2,21
5	1,7	7	3,09 ± 0,02	0,203 ± 0,024	16 ± 1	34,06 ± 2,80	256,82 ± 3,63	784,64 ± 1,02
6	1,4	10	5,95 ± 0,33	0,379 ± 0,003	21 ± 1	37,64 ± 2,88	255,69 ± 3,91	852,91 ± 2,26
7	1,4	7	2,56 ± 0,01	0,194 ± 0,009	21 ± 1	34,25 ± 4,82	288,64 ± 1,90	778,83 ± 7,58
8	1,7	10	8,86 ± 0,03	0,523 ± 0,001	15 ± 1	36,79 ± 3,73	319,30 ± 11,21	812,07 ± 4,17
9	1,4	7	4,93 ± 0,04	0,110 ± 0,001	21 ± 1	31,28 ± 1,50	285,22 ± 7,33	809,08 ± 8,82
10	1,1	10	5,67 ± 0,22	0,384 ± 0,001	28 ± 1	37,08 ± 0,98	281,99 ± 2,07	847,79 ± 2,09
11	1,7	4	8,49 ± 0,19	0,524 ± 0,002	15 ± 1	35,02 ± 8,76	232,76 ± 3,97	840,10 ± 1,15
12	1,1	7	2,90 ± 0,11	0,122 ± 0,01	28 ± 1	34,60 ± 2,06	234,84 ± 13,21	821,49 ± 4,87
13	1,4	7	6,69 ± 0,23	0,415 ± 0,001	21 ± 1	31,70 ± 0,68	237,06 ± 3,85	780,20 ± 7,62
14	1,4	7	4,00 ± 0,08	0,290 ± 0,001	21 ± 1	31,36 ± 2,37	284,68 ± 13,70	818,82 ± 8,94

Tabla 10. Resultados del diseño experimental para el proceso de secado por microondas al vacío (MVD) (II).

Exp	Densidad de potencia (PD)(W/g)	Presión Absoluta (AP)(kPa)	ORAC ( $\mu\text{mol TE/g ss}$ )	FRAP ( $\mu\text{mol TE/g ss}$ )	Lisina disponible (mg $\cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ ss}$ )	Dureza (N)	Trabajo de crocancia (N $\cdot$ mm)
1	1,4	7	24,48 $\pm$ 0,12	19,86 $\pm$ 3,04	259,08 $\pm$ 4,87	8,06 $\pm$ 1,71	0,42 $\pm$ 0,12
2	1,4	7	20,81 $\pm$ 0,33	19,08 $\pm$ 0,69	200,70 $\pm$ 0,70	8,08 $\pm$ 1,51	0,67 $\pm$ 0,18
3	1,1	4	20,67 $\pm$ 0,18	14,39 $\pm$ 0,26	258,34 $\pm$ 2,85	9,46 $\pm$ 2,14	0,89 $\pm$ 0,28
4	1,4	4	13,22 $\pm$ 0,17	17,76 $\pm$ 1,82	279,66 $\pm$ 8,15	7,99 $\pm$ 2,19	0,56 $\pm$ 0,17
5	1,7	7	23,78 $\pm$ 0,23	14,58 $\pm$ 0,07	268,56 $\pm$ 2,14	7,44 $\pm$ 2,00	0,51 $\pm$ 0,22
6	1,4	10	17,29 $\pm$ 0,00	17,77 $\pm$ 1,18	299,84 $\pm$ 4,74	9,57 $\pm$ 2,63	0,75 $\pm$ 0,12
7	1,4	7	18,36 $\pm$ 0,16	18,47 $\pm$ 2,70	240,76 $\pm$ 5,52	8,02 $\pm$ 1,52	0,47 $\pm$ 0,11
8	1,7	10	14,91 $\pm$ 0,18	18,11 $\pm$ 1,69	353,73 $\pm$ 7,93	8,97 $\pm$ 2,13	0,93 $\pm$ 0,28
9	1,4	7	21,73 $\pm$ 0,29	17,22 $\pm$ 0,56	270,39 $\pm$ 3,38	8,80 $\pm$ 2,07	0,41 $\pm$ 0,13
10	1,1	10	23,70 $\pm$ 0,15	17,69 $\pm$ 1,11	259,37 $\pm$ 7,49	9,13 $\pm$ 1,79	0,53 $\pm$ 0,15
11	1,7	4	18,46 $\pm$ 0,07	16,28 $\pm$ 0,19	363,53 $\pm$ 3,15	8,92 $\pm$ 1,40	0,55 $\pm$ 0,21
12	1,1	7	19,93 $\pm$ 0,18	14,32 $\pm$ 1,21	289,79 $\pm$ 3,20	8,36 $\pm$ 2,19	0,44 $\pm$ 0,12
13	1,4	7	18,09 $\pm$ 0,09	16,53 $\pm$ 0,33	251,60 $\pm$ 2,14	7,70 $\pm$ 1,87	0,55 $\pm$ 0,10
14	1,4	7	18,61 $\pm$ 0,08	18,63 $\pm$ 2,14	211,92 $\pm$ 1,35	8,06 $\pm$ 1,96	0,62 $\pm$ 0,18

FRAP: Capacidad de reducción férrica del plasma; ORAC: Capacidad de absorción de radicales de oxígeno.

Tabla 11. ANOVA del diseño experimental para el proceso MVD.

	A:Densidad de potencia, PD (W/g)	B:Presión Absoluta, AP (kPa)	Valor-p				Falta de ajuste
			AA	AB	BB	R <sup>2</sup>	
<b>Humedad</b>	0,296	0,504	0,502	0,605	0,024	63,45	0,533
<b>a<sub>w</sub></b>	0,340	0,637	0,560	0,857	0,027	64,58	0,741
<b>ORAC</b>	0,296	0,587	0,122	0,245	0,049	48,60	0,212
<b>FRAP</b>	0,430	0,147	0,016	0,574	0,357	62,62	0,283
<b>Dureza</b>	0,130	0,206	0,844	0,614	0,008	65,69	0,113
<b>Trabajo de crocancia</b>	0,669	0,477	0,908	0,020	0,036	76,87	0,652
<b>Tiempo de secado</b>	0,000	0,195	0,000	1,000	0,019	99,72	0,222
<b>Vitamina E</b>	0,587	0,017	0,283	0,311	0,075	77,61	0,601
<b>Vitamina C</b>	0,182	0,021	0,410	0,765	0,427	59,07	0,220
<b>Calcio</b>	0,106	0,636	0,398	0,836	0,096	47,71	0,149
<b>Lisina Disponible</b>	0,045	0,871	0,123	0,851	0,054	65,90	0,184

FRAP: Capacidad de reducción férrica del plasma; ORAC: Capacidad de absorción de radicales de oxígeno; R<sup>2</sup>: coeficiente de correlación

- Análisis de tiempo de secado

Para los diferentes experimentos realizados, el tiempo de secado varió entre 15 y 28 min (tabla 9) y fue afectado de forma significativa por la densidad de potencia ( $p < 0,05$ ) (tabla 11). En la figura 36, se muestra la gráfica MSR (36a) y la gráfica de efectos principales (36b) para el tiempo de secado, donde se observa que el mayor tiempo de secado se obtiene con la menor densidad de potencia (PD), lo que es atribuible a la mayor carga del material y por lo tanto a un mayor contenido de agua a eliminar. El mismo comportamiento fue reportado previamente por Darvishi, (2012) para rodajas de papa, quien reportó tiempos de secado entre 2,5 a 23 min, utilizando densidades de potencia que variaron de 5 a 20 W/g, respectivamente. La disminución del tiempo de secado con el incremento de la densidad de potencia, también ha sido reportado para otros productos tales como soja (Hu & Zhang, 2006) y semillas de loto (Jiang et al., 2017).

En los procesos de secado por microondas se han utilizado diversos valores de densidad de potencia, en el rango de 0,75 W/g (Zielinska, Ropelewska, & Markowski, 2017), 1-5 W/g (Ambros, Foerst, & Kulozik, 2018; Bai-Ngeu, Therdtai, & Dhamvithee, 2011; Hu & Zhang, 2006; Huang et al., 2011) y 5-20 W/g (Darvishi, 2012; Jiang et al., 2017; Su et al., 2016), donde, de manera general se reporta que la mayor densidad de potencia conduce a más rápida remoción de agua, con el consecuente menor tiempo de secado; ya que, la velocidad de evaporación es una función de la densidad de potencia del microondas (W/g) (Scaman et al., 2014).

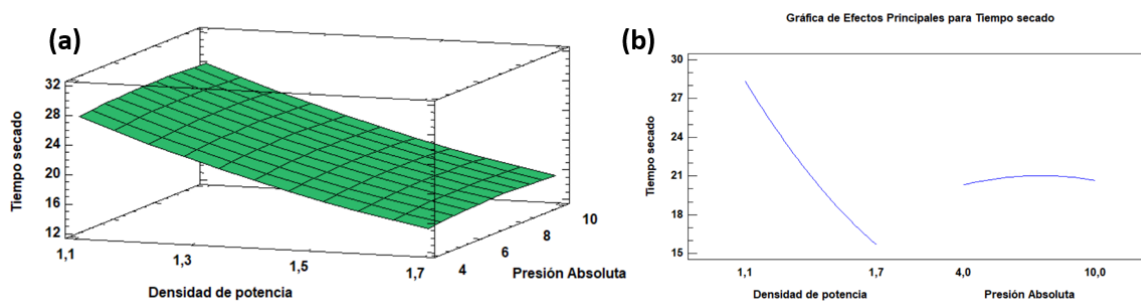


Figura 36. Gráfica MSR (a) y efectos principales (b) para el Tiempo de secado.

De acuerdo con esto, el tiempo de secado llega a ser una variable controlable en el proceso de secado por microondas al vacío, determinada predominantemente por la relación entre la potencia del microondas y la cantidad de agua a ser evaporada (W/g). Por lo tanto, para incrementar la velocidad de secado, o se reduce la carga o se incrementa la potencia aplicada (Scaman et al., 2014), si se mantienen fijos los demás parámetros (temperatura, presión, tipo de muestra, características del material, espesor, velocidad de rotación de la bandeja, entre otros); ya que éstos también pueden afectar la velocidad de secado del proceso (Schubert & Regier, 2005).

- Análisis de compuestos fortificantes

Según los datos mostrados en la tabla 9, el contenido de calcio, en todos los experimentos realizados estuvo en el rango de 778,83 a 866,84 mg·100 g<sup>-1</sup> ss, que corresponde a porcentajes de retención superiores al 90 %. En ese sentido Oladele & Abonsade, (2009), reportaron porcentajes de retención de calcio entre 91 y 95 % cuando secaron espinaca mediante secado solar y convectivo; por otro lado Lima, dos Santos, David, & Ferreira, (2019), secaron hojas de mostaza por medio de microondas y lograron una retención de calcio del 51 %.

Con respecto al análisis estadístico, se tiene que el contenido de calcio no fue afectado significativamente por ninguno de los factores estudiados ( $p > 0,05$ ) (tabla 11). Los altos valores de retención alcanzados se deben a la naturaleza de este compuesto fortificante, ya que al ser un nutrimento inorgánico no se ve afectado por la luz y la temperatura (Badui, 2006; FAO, 2009).

De acuerdo a los resultados obtenidos, el contenido de vitamina C osciló entre 209,20 y 319,30 mg·100 g<sup>-1</sup> ss (tabla 9), lo que corresponde a porcentajes de retención entre 44 – 67 % de la misma. El menor porcentaje de retención se debe a que es la más inestable de todas las vitaminas y puede degradarse fácilmente durante el procesamiento (Herbig & Renard, 2017).



En ese sentido, se ha reportado que el contenido de agua es de gran importancia en la reducción de la vitamina C, ya que a medida que disminuye el contenido de humedad, disminuye el grado de dilución y por lo tanto la velocidad de reacción aumenta para dar una menor retención de vitamina C (Asard, May, & Smirnoff, 2005; Khraisheh, McMinn, & Magee, 2004). Khraisheh et al., (2004) encontraron que el fenómeno descrito con anterioridad, es más aparente durante el procesamiento por microondas, ya que se puede lograr un rango más amplio de niveles de humedad, como se encontró en el presente trabajo.

En cuanto a los resultados de vitamina E, se lograron valores de 31,28 a 37,64 mg·100 g<sup>-1</sup> ss (tabla 9), que corresponde a porcentajes de retención entre de 66 – 80 % de vitamina E. Estos valores de retención se deben a que la forma adicionada de la vitamina E ( $\alpha$ -tocoferol acetato) mejora su estabilidad y es la más usada en suplementos (Blé-Castillo et al., 2008).

Sin embargo y de acuerdo a la literatura, esta vitamina es sensible al oxígeno y la temperatura (Pereira et al., 2015) y su naturaleza termolábil también ha sido previamente documentada (Badui, 2006; Eitenmiller & Lee, 2004; Litwack, 2007); además, durante el secado las matrices sólidas pueden exponer nuevos sitios catalíticos, lo cual contribuye a la disminución del contenido de vitaminas.

De forma similar, otros investigadores han reportado la pérdida de vitaminas C y/o E en papa (Wang et al., 2010), manzana (Cortés, Osorio, & García, 2007), uchuva (Cortés et al., 2015), castañas chinas (Zhang et al., 2018) y papa dulce (Laurie et al., 2015) cuando estos alimentos se han sometido a procesos de secado.

Con respecto al análisis de varianza, el contenido de vitaminas E y C fueron afectadas significativamente por la presión absoluta (AP) ( $p < 0,05$ ) (tabla 11), a mayor presión absoluta (esto es, menor vacío aplicado), mayor fue la retención de las vitaminas. Las figuras 37 y 38 muestran las gráficas MSR (37a y 38a) y las gráficas de efectos principales (37b y 38b) para la vitamina E y C, respectivamente, donde se puede observar este efecto.

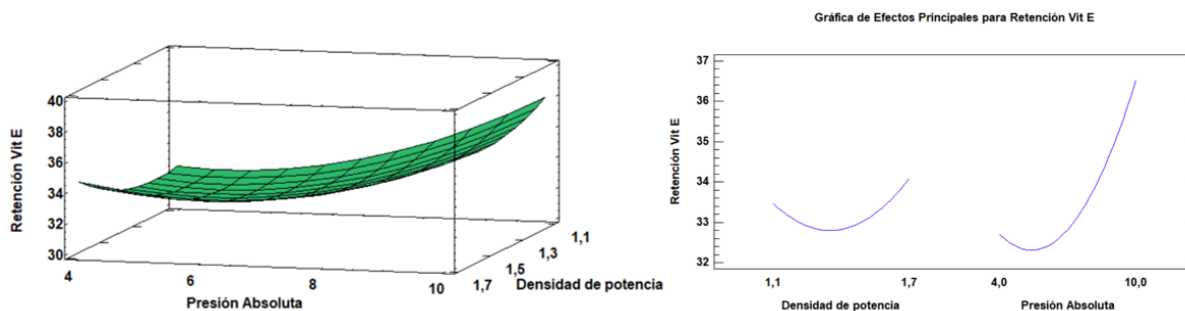


Figura 37. Gráfica MSR (a) y efectos principales (b) para la Vitamina E.

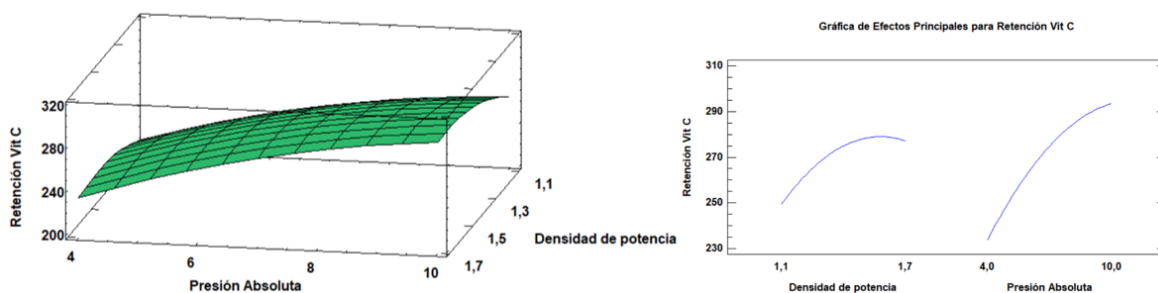


Figura 38. Gráfica MSR (a) y efectos principales (b) para la Vitamina C.

Aunque se ha reportado que el uso de vacío ayuda a preservar los compuestos (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003), el impacto de la presión de la cámara en el secado por microondas se discute realmente de forma controvertida y puede ser específico de cada sistema (Ambros et al., 2018; Bondaruk et al., 2007; Cui et al., 2004; Kraus et al., 2013; Scaman et al., 2014). Por un lado, a medida que disminuye la presión, el calor latente de vaporización aumenta ligeramente; esto contribuye a una ligera disminución en la velocidad de secado a la misma potencia del microondas, por ende un mayor tiempo de proceso y probablemente mayor pérdida de compuestos. Sin embargo, por otro lado, cuanto menor es la presión en la cámara de secado, mayor es la fuerza impulsora para que el vapor de agua se difunda del producto, por lo tanto, la humedad puede ser removida más rápidamente a una presión más baja de operación. La magnitud relativa de estos dos efectos opuestos puede depender de la configuración del equipo utilizado para la deshidratación, así como de las características de la muestra.

En los procesos de secado por microondas se ha utilizado un amplio rango de presión absoluta, esto es, 1- 4 kPa (Ambros et al., 2018; Kowalska et al., 2018; Lefort et al., 2003; Setiady, Tang, et al., 2009; Zielinska et al., 2013) y 5-20 kPa (Bai-Ngew et al., 2011; Huang et al., 2011; Jiang et al., 2017; Zielinska et al., 2017). Otros investigadores reportan el uso de presiones de vacío del orden 60 -90 kPa (Cui et al., 2018; Jiang et al., 2015; Li et al., 2017; Zhang et al., 2018). Sin embargo, el efecto del vacío es menos evaluado con relación a otras variables del proceso como la potencia, la densidad de carga y la temperatura. Algunos estudios han atribuido la conservación de compuestos de interés durante el MVD al uso de bajas temperaturas (Gaukel et al., 2016; Scaman et al., 2014).

- Análisis de la capacidad antioxidante.

En cuanto a la capacidad antioxidante, ésta fue evaluada utilizando los métodos ORAC y FRAP.

Los valores ORAC para la papa fresca fueron de  $20,04 \pm 1,65 \mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1}$  ss (tabla 4), mientras que para los chips preparados con las diferentes condiciones experimentales de secado por microondas al vacío estuvieron en el rango de  $13,22 - 24,48 \mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1}$  ss (tabla 10). Los valores inferiores para los chips respecto a la papa fresca, pueden deberse a posibles procesos de degradación que sufrieron los compuestos antioxidantes. Se ha reportado que temperaturas superiores a  $60^\circ\text{C}$  son desfavorables para los compuestos antioxidantes (Oancea et al., 2017; Osorio-Arias et al., 2019) aunque algunos estudios reportan pérdidas trabajando con temperaturas menores (Samoticha, Wojdyło, & Lech, 2016). Por su parte, los valores superiores se pueden atribuir a la mayor extracción de compuestos antioxidantes desde el interior de la matriz durante el procesamiento (Barba, Esteve, & Frigola, 2013; Vicente Illera, 2012). Christele Andre et al., (2007), reportaron valores ORAC de  $(28,25 - 250,67 \mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1})$  para diferentes cultivares andinos crudos, donde los mayores valores corresponden a variedades de papa coloreadas, que han reportado tener la mayor capacidad antioxidante (Singh & Kaur, 2016). Cabe señalar, que la capacidad antioxidante ORAC no presentó correlación con ninguna de las vitaminas antioxidantes adicionadas, probablemente debido a la forma química en que fue adicionada la vitamina E ( $\alpha$ -tocoferol acetato) y

también al mecanismo de acción de las vitaminas (Zapata et al., 2014); por lo tanto, sus fluctuaciones pueden atribuirse principalmente a las condiciones de procesamiento (Yang, Achaerandio, & Pujolà, 2016), como se explicó anteriormente.

Por su parte, los valores FRAP encontrados para la papa cruda fueron  $12,26 \pm 1,84$   $\mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1}$  ss (tabla 4) y para los chips preparados con las diferentes condiciones experimentales, estuvieron en el rango de  $14,32 - 19,86$   $\mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1}$  ss (tabla 10). En este caso, se presentó una correlación positiva significativa entre los valores FRAP y el contenido de Vitamina C (0,7467) (anexo 6), por lo que este aumento de capacidad antioxidante en los chips es atribuible al nivel de vitamina C alcanzado con la impregnación. Esta correlación ha sido previamente observada por Du, Li, Ma, & Liang, (2009) y se debe a que el mecanismo de acción del ensayo de FRAP es el de transferencia de electrones (SET) (Contreras-Calderón et al., 2016), que es bastante sensible al ácido ascórbico, ya que se ha correlacionado el potencial redox de esta vitamina con un mecanismo tipo SET (Londoño Londoño, 2012; Pérez, 2012). La actividad antioxidante del ácido ascórbico se debe a que posee dos grupos OH con posibilidad de ceder dos electrones para reducir dos sustancias oxidativas (Botero, 2008). Adicionalmente, los valores FRAP obtenidos para los chips fueron mayores que los obtenidos por Nemš et al., (2015):  $1,74 - 13,31$   $\mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1}$  ss para chips elaborados con papas de colores. Finalmente Kita et al., (2013), reportaron valores FRAP para la papa cruda de  $16,7 - 35,7$   $\mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1}$  ss y para los chips de  $7,6 - 24,1$   $\mu\text{mol TE}\cdot\text{g}^{-1}$  ss, donde, en todos los casos los chips presentaron menor capacidad antioxidante que la papa cruda, indicando que el grado de reducción fue dependiente de la variedad.

Finalmente, ninguno de los factores analizados tuvo influencia significativa sobre los métodos de capacidad antioxidante evaluados (tabla 11); lo anterior debido quizás a las diferencias entre la capacidad antioxidante de la papa cruda, las cuales se deben a las diferencias edafoclimáticas de cada variedad, éstas inducen a contenidos variables de fitoquímicos naturales como compuestos fenólicos, antocianinas, carotenoides y vitaminas, que están relacionadas con la actividad antioxidante (Yamdeu Galani et al., 2017).

- Análisis de la lisina

En relación a la lisina disponible, el contenido encontrado en la papa cruda fue de  $415,5 \pm 1,5$  mg lys · 100 g<sup>-1</sup> ds. Se ha reportado que las proteínas de la papa están compuestas en una alta proporción de proteínas ricas en el aminoácido lisina (Bradshaw et al., 2007; Singh & Kaur, 2016), presentando valores entre 310 – 760 mg lys · 100 g<sup>-1</sup> sólidos (Peksa et al., 2013; Woolife, 1987). Por su parte, el contenido obtenido para los chips de papa estuvo en el rango entre 200,70 – 363,53 mg lys · 100 g<sup>-1</sup> ss (tabla 10), los cuales corresponden a pérdidas entre 12 y 51 %.

Varios investigadores han relacionado previamente la pérdida de lisina con la reacción de Maillard (Contreras-Calderón, Guerra-Hernández, & García-Villanova, 2009; Gómez-Narváez et al., 2019; Jouquand et al., 2015; Mogol et al., 2013), debido a que la lisina reacciona fácilmente con los azúcares reductores, siendo una de las implicaciones nutricionales más antiguas conocidas. Jaswal (1972), encontró pérdidas de lisina disponible entre 38 - 67 % en la preparación de chips de papa; mientras que Gorinstein, Yamagata, & Hadziyev (1988), determinaron pérdidas de lisina entre 21 – 59 %. Por otro lado, Žilić, Božović, Savić, & Šobajić, (2006) encontraron que la disminución en la disponibilidad de lisina correspondía al 69,5 % en la soya procesada por microondas.

Con respecto al análisis estadístico, se pudo determinar que el contenido de lisina disponible fue afectado significativamente por la densidad de potencia (DP) ( $p < 0,05$ ) (tabla 11), resultando en mayor contenido de lisina disponible con la mayor densidad de potencia, esto puede estar indirectamente relacionado con la duración del proceso de microondas, ya que con mayor densidad de potencia (menor carga del material) menor era el tiempo de secado, por lo que habría menor pérdida de lisina; esto se puede observar por la correlación entre la lisina y el tiempo de secado (anexo 6), que aunque no fue significativa, es negativa.

- Análisis de parámetros texturales

Las características texturales de los chips fueron evaluadas con relación a la dureza y el trabajo de crocancia. La dureza estuvo en el rango entre 7,44 y 9,57 N (tabla 10), mientras que el trabajo de crocancia ( $W_c$ ) estuvo entre 0,41 - 0,93 N·mm (tabla 10). Los factores analizados no influyeron significativamente sobre ninguno de los parámetros de textura evaluados ( $p > 0,05$ ) (tabla 11). Sin embargo, se ha reportado que además de las condiciones de procesamiento, las propiedades de la papa cruda, el contenido de almidón y la humedad final del producto juegan un papel importante en la formación de la textura del producto (Salvador et al., 2009).

Es así como en este estudio, se encontraron correlaciones positivas significativas entre el trabajo de crocancia y la humedad (0,6112) y el trabajo de crocancia y la actividad de agua (0,6602); es decir, los valores para el trabajo de crocancia incrementan con el incremento de la humedad y la actividad de agua, y debido a que el trabajo de crocancia describe el trabajo requerido para fracturar un poro o un grupo de poros (Azzollini, Derossi, Fogliano, Lakemond, & Severini, 2018), esto indica que se necesita más trabajo para deformar o fracturar las células (Sun, 2012). Esto implica que el producto final posee características de crocancia deseables en este tipo de productos.

Adicionalmente, se encontró correlación significativa positiva entre la dureza y el contenido de calcio (0,8347); esto se debe al incremento del contenido de este mineral durante el proceso IV, ya que ha sido reportado que el calcio establece uniones con las pectinas, formando pectatos de calcio que incrementan la rigidez de la pared, haciendo el tejido más resistente (Badui, 2006; Gras et al., 2003), dado que la pectina es particularmente abundante en las paredes celulares de la papa (Singh & Kaur, 2016), todo esto con un efecto positivo en la textura de la papa. Comportamiento similar ha sido previamente descrito para otras matrices alimentarias como mango, piña, zanahoria y berenjena (Gras et al., 2003; Mateus de Lima et al., 2016; Torres et al., 2008).

- Optimización del proceso

Las variables respuesta de textura pudieron ser ajustadas al modelo general (ecuación 13), ya que, de acuerdo con la tabla 11 la falta de ajuste tuvo valores  $p > 0,05$ . En ese sentido, las ecuaciones 17, 18 y 19 muestran el comportamiento de las variables respuesta con  $R^2 > 70$ , esto es, el trabajo de crocancia ( $W_c$ ) ( $R^2 = 76,87$ ), el tiempo de secado ( $D_t$ ) ( $R^2 = 99,72$ ) y el contenido de vitamina E (VitE) ( $R^2 = 77,59$ ), respectivamente:

$$W_c = 3,52 + 0,20 \times PD \times AP + 0,02 \times AP^2 \dots\dots\dots (17)$$

$$D_t = 69,22 - 52,22 \times PD + 11,11 \times PD^2 - 0,05 \times AP^2 \dots (18)$$

$$\text{VitE} = 49,18 - 0,96 \times AP \dots\dots\dots (19)$$

donde PD es densidad de potencia, y AP es la presión absoluta en la cámara de secado.

Finalmente, teniendo los modelos ajustados para cada respuesta, se procedió a realizar el método de optimización conjunta utilizando la función de deseabilidad. Para esto, se tomaron las variables respuesta con  $R^2 > 70\%$  y con el criterio de máxima cantidad de vitamina E, mínimo tiempo de secado y mínimo trabajo de crocancia. Adicionalmente, se establecieron los *impactos* (1,0-5,0) con base en la importancia de las variables respuesta en el proceso de secado MVD, y se fijaron los *pesos* (0,1-10,0) de cada una de ellas, de acuerdo a la permisibilidad de que la variable respuesta se distancie del criterio establecido (STATGRAPHICS, 2006; StatPoint Technologies Inc., 2010).

De esta forma, se llegó a la combinación de factores que alcanza la deseabilidad global óptima, potenciando las variables respuesta, con una deseabilidad de 0,87; esto es, presión absoluta (AP) 4,0 kPa y densidad de potencia (PD)  $1,7 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$ . Adicionalmente, la deseabilidad evaluada en cada punto de diseño puede ser observada en el anexo 7. Según estos resultados, la combinación de los factores experimentales que simultáneamente optimiza las variables respuesta, coincidió con las condiciones experimentales

correspondientes al Tratamiento N°11 (tabla 2), obteniendo el mismo valor de deseabilidad (anexo 7) por lo que se eligió trabajar con el mejor tratamiento.

#### 4.3.3 Análisis Proximal de los chips de papa deshidratados con las condiciones óptimas de secado

La figura 39, muestra los chips de papa fortificados con calcio y vitaminas C y E y deshidratados con las condiciones óptimas de secado por microondas al vacío, mientras que en la tabla 12, se muestran los resultados del análisis proximal. El valor de humedad, se encuentra dentro de los rangos obtenidos para otros chips de papa obtenidos mediante diferentes métodos 2 - 11,5 % (Barreto et al., 2019; Lefort et al., 2003; Trujillo-Agudelo et al., 2019).



*Figura 39. Chips obtenidos con las condiciones óptimas de secado.*

Salvador et al., (2009), encontraron menores valores de humedad (1,5 - 3,0 %), pero mayor contenido de grasa (18,7 – 36,9 %) en seis muestras de chips de papa comerciales elaborados mediante fritura convencional. De manera general, se reporta que el contenido de grasa en chips de papas fritas oscila entre 33 – 38 % (Dourado et al., 2019; Joshi et al., 2016), el cual es frecuentemente asociado con enfermedades, lo que implica un factor de riesgo para la salud (Trujillo-Agudelo et al., 2019; World Health Organization, 2018). De forma contraria, Joshi et al., (2016), al elaborar chips mediante microondas reportaron porcentaje de grasa de 3,09 %, esto debido a que la papa cruda es baja en grasa, como se evidenció en la caracterización fisicoquímica (tabla 3), pero su forma de procesamiento con aceite es lo



que aumenta su contenido de grasa (FAO, 2008a). Finalmente, el contenido de proteína, ceniza y carbohidratos está dentro de valores previamente reportados (Singh & Kaur, 2016; Woolife, 1987). De acuerdo con estos resultados, los chips de papa elaborados mediante microondas al vacío pueden ser considerados como bajos en grasa, los cuales, cumplirían con las demandas actuales que se dirigen hacia productos libres o bajos en grasa (Leeratanarak et al., 2006).

Tabla 12. Composición proximal de los chips fortificados y deshidratados con las condiciones óptimas.

Parámetro (% bh)	Valor $\pm$ SD
Humedad	4,51 $\pm$ 0,00
Ceniza	4,88 $\pm$ 0,00
Grasa	0,02 $\pm$ 0,00
Proteínas	8,04 $\pm$ 0,24
Carbohidratos	82,60 $\pm$ 0,00

bh: base húmeda; SD: desviación estándar.

Finalmente, el contenido de calcio, vitamina C y vitamina E en los chips de papa fortificados y deshidratados con las condiciones óptimas, fue de  $892,90 \pm 10,95 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  ss,  $289,10 \pm 6,34 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  ss, y  $36,97 \pm 3,73 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  ss, respectivamente.

#### 4.3.4 Análisis Sensorial por aproximación multidimensional de los chips de papa deshidratados con las condiciones óptimas de secado

La figura 40, muestra los resultados del análisis sensorial por aproximación multidimensional para la textura, sabor y olor de los chips obtenidos con las condiciones óptimas de secado. Los atributos encontrados para la textura fueron: *duro* (THD), *crocante* (TCP), *seco* (TDR), *fibroso* (TFB), *masticable* (TCW) y *grumoso* (TLM); para el sabor: *salino* (SSL), *dulce* (SSW), *almidón* (SST), *fresco* (SFS), *vegetal* (SVG), *ácido* (SAC) y *astringente* (SAS), y para el olor: *almidón* (OST), *dulce* (OSW), *fresco* (OFS), *salino* (OSL) y *vegetal* (OVG).

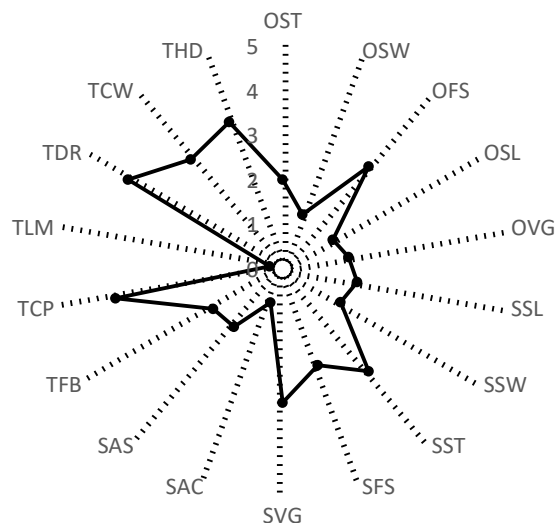


Figura 40. Perfil sensorial multidimensional de los chips obtenidos con las condiciones óptimas de MVD.

En cuanto al sabor, el descriptor *astringente* puede ser asociado con la presencia de compuestos polifenólicos en la papa, ya que según López-Cobo et al., (2014) estos metabolitos juegan un rol decisivo en la calidad sensorial, aportando la astringencia y el amargor; mientras que los descriptores *ácido* y *salino* son atribuibles a la adición en la emulsión de impregnación de ácido ascórbico y sal, respectivamente.

Respecto al olor, los tubérculos de papa liberan un amplio rango de compuestos volátiles y los métodos de procesamiento determinan el tipo y la extensión (Singh & Kaur, 2016); además, dado que tanto el olor y el sabor son procesados e interpretados en la misma región del cerebro (Singh & Kaur, 2016), no es sorprendente que presenten atributos similares. En cuanto a la textura, se destaca el atributo *crocante* ya que es un determinante importante de la calidad de los chips de papa (Lefort et al., 2003). Salvador et al., (2009) indicaron que cierto grado de dureza sensorial es necesaria para la percepción de la crocancia, y en este estudio se percibieron ambos descriptores *crocante* y *duro*. Además, este último también puede ser parcialmente atribuido a la adición de calcio en la emulsión de impregnación. Finalmente, la calidad general fue evaluada como *alta*. Asimismo, Tiwari et al., (2018) pudieron fortificar chips de papa hasta un contenido de  $700 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  de calcio con atributos sensoriales aceptables. Otros alimentos deshidratados mediante MVD, que han

sido generalmente aceptables para los consumidores son chips de papa y manzana (Huang et al., 2011) y fresas (Kowalska et al., 2018).

#### 4.3.5 Relevancia de los resultados obtenidos

Hasta este momento, se resalta la importancia de los resultados obtenidos, las condiciones óptimas de secado por microondas al vacío, esto es, densidad de potencia (DP)=1,7 W/g y presión absoluta (AP) = 4,0 kPa que permitieron la obtención de chips deshidratados con adecuadas características texturales, nutricionales y funcionales. Además, el proceso MVD permitió la retención de los compuestos fortificantes adicionados en la etapa de impregnación, sin alterar las características sensoriales del producto. Dado que los chips fueron obtenidos en un equipo a escala semi-industrial, estas condiciones de secado pueden ser replicadas en la obtención de este tipo de productos, por lo que los resultados representan un avance en el desarrollo de chips de papa bajos en grasa.

### 4.4. Etapa 4. Objetivo específico N°4

#### 4.4.1 Estabilidad de compuestos adicionados durante el almacenamiento

La figura 41, muestra el comportamiento de los compuestos adicionados durante doce semanas de almacenamiento, empacados en atmósfera con Nitrógeno (100N) y sin Nitrógeno (0N), mientras que el anexo 8 muestra el Análisis de Varianza, la Prueba de Múltiples Rangos y el Gráfico de Medias para los diferentes tratamientos.

Para el caso del calcio (41a), éste presentó diferencias significativas por efecto de la atmósfera de envasado y de la semana de almacenamiento ( $p < 0,05$ ); sin embargo, dada la naturaleza de este compuesto, al ser un mineral, estas diferencias pueden atribuirse a

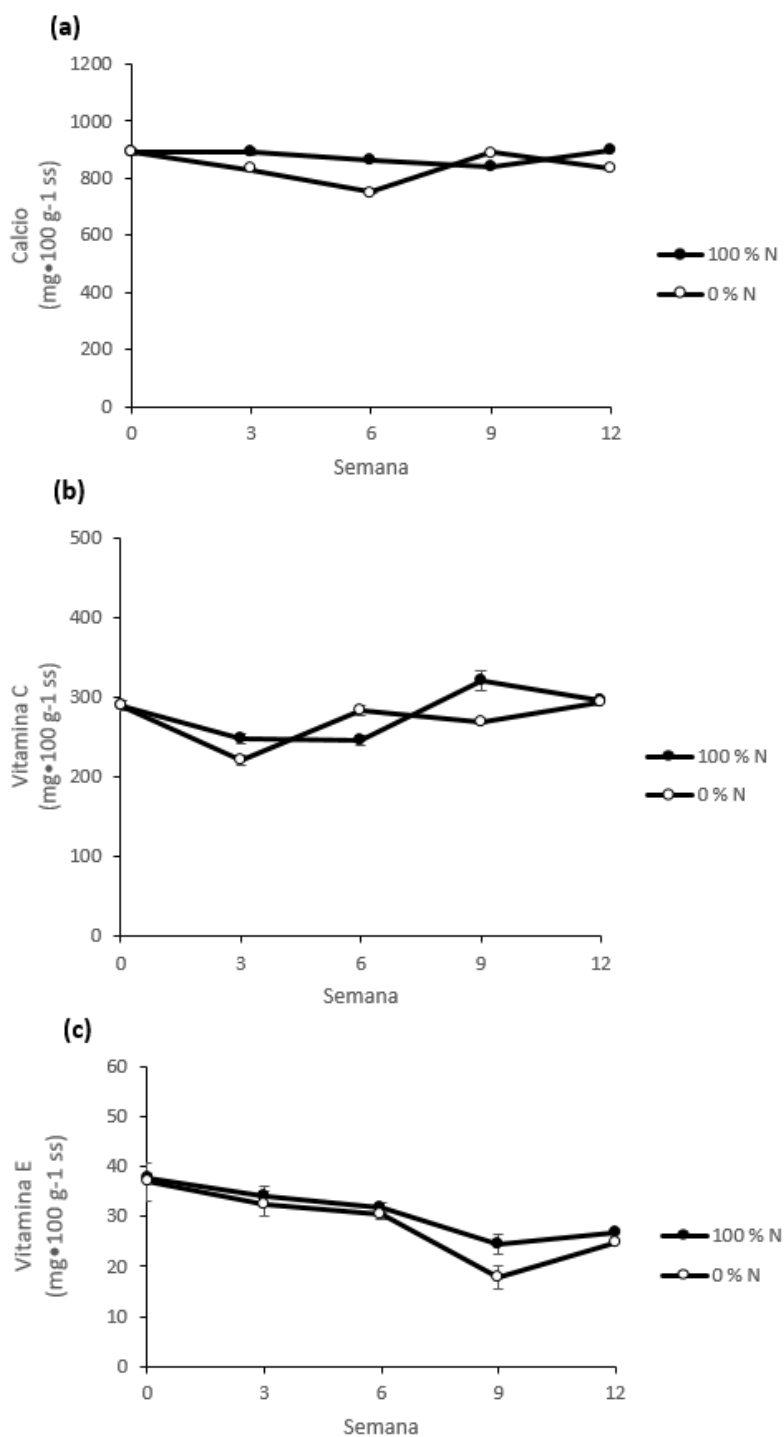


Figura 41. Estabilidad de calcio (a), vitamina C (b) y vitamina E (c) para los chips de papa fortificados y deshidratados con las condiciones óptimas de secado MVD.

diferencias en el proceso de impregnación en sí, más que por efecto del almacenamiento; además, la gráfica permite observar que la tendencia fue permanecer constante, y las

diferencias son debidas a la variabilidad en la impregnación la cual ha sido reportada en la impregnación de papa con otros compuestos como ácido ascórbico (Hironaka et al., 2011) y zinc (Erihemu, Hironaka, et al., 2015).

La figura 41b, muestra el contenido de vitamina C durante el almacenamiento, la cual no presentó diferencias por efecto de la atmósfera de envasado; lo cual implica que no es necesario el uso de atmósfera de Nitrógeno para disminuir la oxidación de esta vitamina. Se podría decir que el contenido de vitamina C durante las semanas evaluadas estuvo en promedio de  $275 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  ss (lo que representa pérdidas de aproximadamente 7 %) y las diferencias se pueden atribuir al proceso mismo de impregnación, como en el caso del calcio. En ese sentido, Hironaka et al., (2011), al impregnar papas enteras con ácido ascórbico, reportaron pérdidas de aproximadamente 37 % durante 14 días de almacenamiento y adicionalmente encontraron que la impregnación ocurre mayoritariamente en la médula central y en las áreas entre el anillo vascular y el peridermo y en menor medida en la región perimedular. Esto implica que la porción de la rodaja en que se tome la muestra también puede conducir a resultados variables y podría ser la causa del comportamiento de la vitamina C durante el almacenamiento observado en la figura. Por lo tanto, se podrían realizar estudios posteriores de impregnación, evaluando diferentes secciones en el tubérculo. No obstante, al comparar este estudio con Hironaka et al., (2011) en la impregnación de vitamina C, los resultados obtenidos sugieren que someter las papas fortificadas a alguna estabilización después de la impregnación (por ejemplo, el secado por microondas al vacío en este caso) podría dar como resultado una protección más efectiva para los componentes agregados.

Con respecto a la vitamina E (41c), ésta no presenta diferencias por efecto del factor atmósfera de envasado ( $p > 0,05$ ) pero sí por efecto de la semana de almacenamiento ( $p < 0,05$ ), resultando en pérdidas de 29 y 32 % para los tratamientos 100N y 0N, respectivamente. Sin embargo, la concentración al final del almacenamiento, correspondiente a  $24,9 \pm 0,1 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  ss y  $26,9 \pm 0,4 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  ss para 0N, y 100N, respectivamente; fue aún superior al contenido de vitamina E en las muestras sin fortificar ( $0 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  ss), lo que evidencia la viabilidad de las técnicas combinadas. Además, el hecho de que no se necesite adicionar Nitrógeno para empacar las muestras disminuye el costo potencial del producto.

En ese sentido, Cortés, Osorio, et al., (2007) evaluaron la estabilidad de la vitamina E en manzana deshidratada y fortificada y reportaron pérdidas de 28 y 37 % durante 180 días de almacenamiento a 20 y 30 °C, respectivamente; ellos observaron alta variabilidad, atribuyendo estas diferencias a los niveles de impregnación y fluctuaciones en los procesos de oxidación. Finalmente, se debe tener en cuenta que el contenido de calcio y vitaminas C y E al final del almacenamiento sigue siendo mayor al encontrado en la papa fresca (numeral 4.2.5). Por lo tanto, la impregnación al vacío junto con el secado por microondas al vacío, son métodos efectivos para producir chips de papa fortificada y deshidratada baja en grasa.

Con base en los resultados anteriormente expuestos, y dado que no existieron diferencias significativas por efecto de la atmósfera de envasado para las vitaminas C y E, propensas a procesos oxidativos, se decide realizar los experimentos posteriores utilizando muestras empacadas en condiciones normales de aire, referidas como 0N.

#### 4.4.2 Digestibilidad del almidón

##### 4.4.2.1 Contenido de calcio y vitaminas C y E en los chips sin fortificar

Inicialmente cabe aclarar que el contenido de calcio, vitamina C y vitamina E en los chips de papa sin fortificar fue de  $45,91 \pm 1,78 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ ss}$ ,  $26,43 \pm 0,45 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ ss}$ ,  $0 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \text{ ss}$ , respectivamente. Esto implica que con la fortificación se alcanzó 19 veces más el contenido de calcio y 10 veces más el contenido de vitamina C; al compararlo con los valores obtenidos para los chips de papa fortificados (numeral 4.3.3). En función de lo anterior se hacen los análisis consecuentes.

##### 4.4.2.2 Digestibilidad *in vitro* del almidón

Se determinó la digestibilidad *in vitro* del almidón, de los chips de papa fortificadas (F), y se utilizaron chips deshidratados sin fortificar (SF) como control; la figura 42 muestra los resultados obtenidos para el porcentaje de hidrólisis de almidón de las dos muestras, y en

el anexo 9 se presentan las tablas ANOVA y pruebas de múltiples rangos para cada una de las etapas de la digestión.

Durante la digestión gástrica simulada (G0-G30), un alto porcentaje de almidón permaneció sin digerir debido a la ausencia de amilasas en el fluido gástrico, en ese sentido, el porcentaje de hidrólisis alcanzado para F y SF no presentó diferencias significativas y estuvo en el rango entre (0,41- 4,97 %), siendo atribuido a la hidrólisis ácida, como previamente se ha reportado (Bordoloi, Singh, et al., 2012; Chen et al., 2018; Tian et al., 2017).

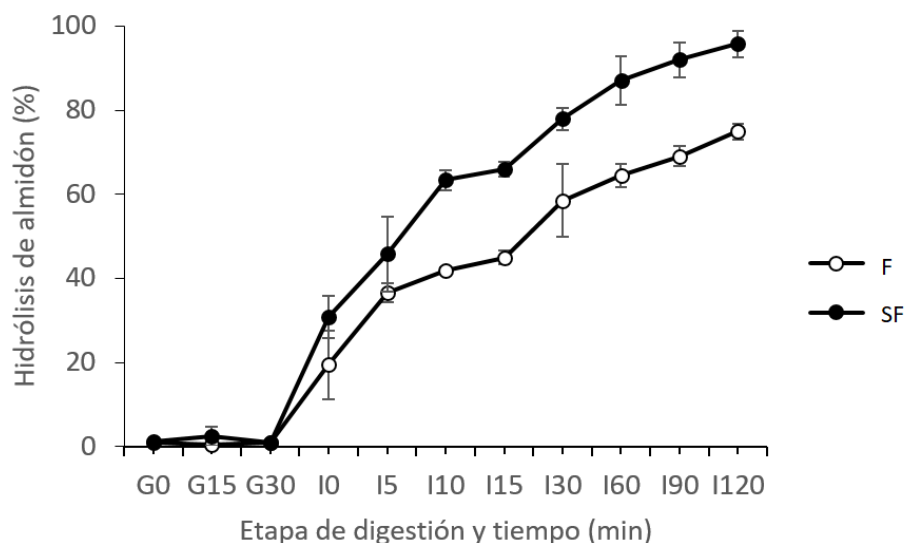


Figura 42. Hidrólisis de almidón de los chips fortificados (F) y sin fortificar (SF). Las barras de error representan la desviación estándar (n=3).

Sin embargo, a los 10 min de digestión intestinal simulada (I10), el porcentaje de hidrólisis incrementó debido a la acción de amilasas pancreáticas y aproximadamente entre el 42 al 63 % del almidón fue hidrolizado tanto para las muestras fortificadas como las no fortificadas, respectivamente. Al final de la digestión intestinal simulada (I120), las muestras fortificadas tuvieron una hidrólisis aproximada del 74 %, en tanto que las muestras sin fortificar alcanzaron una hidrólisis de alrededor del 95 %.

Estas diferencias pueden ser atribuibles a la interacción entre los compuestos adicionados y las enzimas y/o la acción de los compuestos adicionados con la matriz de la papa, conduciendo en general a disminuir el porcentaje de hidrólisis. Aunque es sabido que el calcio cataliza la reacción de la enzima amilasa (Morris, Fichtel, & Taylor, 2011; Singh et al., 2010); el ácido ascórbico ha sido reportado ser un potente inhibidor de las amilasas pancreáticas y salivales, disminuyendo la actividad enzimática en un 100 % (Abell, Ratcliffe, & Gerrard, 1998). Borah, Sarkar, & Duary, (2019) encontraron una actividad inhibitoria significativa exhibida por el ácido ascórbico sobre la amilasa pancreática humana, y manifiestan que ocurre mediante inhibición alostérica, esto es, el ácido ascórbico no actúa sobre los sustratos sino que actúa sobre las enzimas, para resistir la hidrólisis enzimática. Por lo tanto, en este estudio, la presencia de vitamina C en los chips fortificados podría contribuir a la disminución del porcentaje de hidrólisis, actuando sobre las enzimas amilasas en lugar de sobre la estructura de la papa.

Con relación a la vitamina E, ha sido reportado que tanto los lípidos endógenos como los adicionados durante el procesamiento de alimentos pueden afectar la digestibilidad del almidón por medio de la formación de complejos con la amilosa (Nayak et al., 2014). Por lo tanto, la vitamina E puede interactuar con la amilosa del almidón conduciendo a disminuir la tasa de hidrólisis global. Adicionalmente, el  $\alpha$ -tocoferol acetato, durante la digestión simulada, es propenso a ser convertido en  $\alpha$ -tocoferol por acción de las enzimas digestivas (Kramer-Stickland & Liebler, 1998; Yang et al., 2015; Yang & McClements, 2013).

Por otro lado, el efecto del calcio en la digestibilidad del almidón puede ser explicado por la composición de la pared celular de la papa. La pared celular generalmente se compone de tres niveles de organización: lamela media, pared celular primaria y pared celular secundaria (figura 43) (Singh & Kaur, 2016). En la lamela media del parénquima de la papa, la pectina es el principal constituyente (Caffall & Mohnen, 2009; Singh & Kaur, 2016) y es propensa a reaccionar con el calcio en forma de  $\text{Ca}^{2+}$  presentando una tendencia a la formación de enlaces entre las moléculas de pectina y la pared celular del tubérculo de la papa (Murayama et al., 2017).



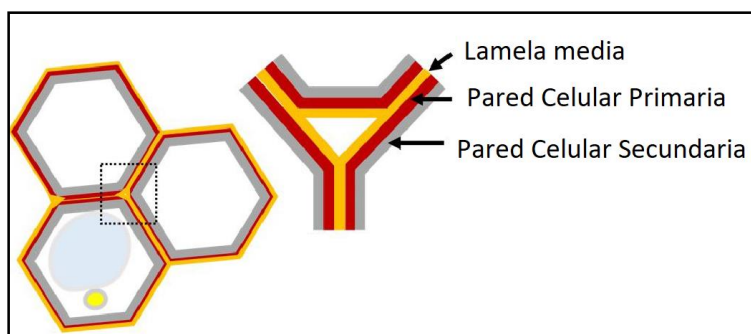


Figura 43. Diagrama de pared celular mostrando lamela media y pared celular primaria y secundaria. Modificado de Xiao & Anderson, (2013).

En ese sentido, es de esperarse que con las concentraciones de calcio adicionadas a la papa, estas reaccionen con la pectina, incrementando la estabilidad térmica de los polisacáridos (Murayama et al., 2017). Además, la pectina en la papa también está confinada en el revestimiento de los espacios intercelulares y en la unión celular, lo que respalda el hecho que luego del proceso de fortificación mediante IV, el calcio podría unirse a la pectina.

Numerosos estudios han descrito la adición de calcio como pretratamiento con el fin de mejorar la textura del producto final en alimentos amiláceos y no amiláceos (Alzamora et al., 2005; Occhino et al., 2011; Torres et al., 2008). En el caso de la papa, se ha reportado que la disponibilidad de  $\text{Ca}^{2+}$  es el factor limitante para la formación de enlaces con la pectina dentro de la pared celular del tubérculo (Murayama et al., 2017), por lo tanto, la adición de calcio puede superar esta limitación y dar fuerza a la pared celular (Gras et al., 2003; Tiwari et al., 2018), resultando en productos de papa más firmes. Adicionalmente, el calcio y la pectina pueden formar una red que podría conducir a la formación de gel, el cual, al competir con el almidón por el agua, restringe la hidratación e hinchamiento del almidón.

#### 4.4.2.3 Propiedades de empastamiento

Los perfiles RVA de los chips fortificados (F) y si fortificar (SF) se muestran en la figura 44 y las propiedades de empastamiento en la tabla 13. Los chips SF tuvieron significativamente mayores valores de viscosidad de la pasta: viscosidad pico (PV, del inglés *Peak Viscosity*), viscosidad de la pasta caliente (TV, del inglés *Trough Viscosity* o *Hot Paste Viscosity*), viscosidad final (FV, del inglés *Final Viscosity*), índice de inestabilidad del gel

(BD, del inglés *Breakdown Viscosity*), e índice de estabilidad del gel (SB, del inglés *Setback Viscosity*) y también significativamente menor temperatura de empastamiento (PT, del inglés *pasting temperature*). En el anexo 10 se presentan las tablas ANOVA y pruebas de múltiples rangos para cada una de las propiedades de empastamiento.

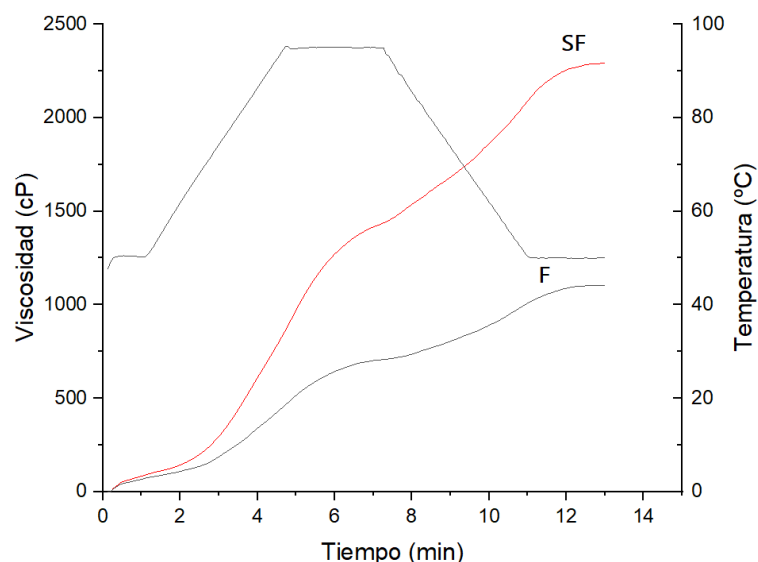


Figura 44. Perfil de empastamiento RVA de los chips fortificados (F) y sin fortificar (SF).

Tabla 13. Propiedades de empastamiento de los chips fortificados (F) y sin fortificar (SF).

Chips de papa	Pico de viscosidad máxima (PV) (cP)	Viscosidad de la pasta caliente (TV) (cP)	Índice de inestabilidad del gel (BD) (cP)	Viscosidad Final (FV) (cP)	Índice de estabilidad del gel (SB) (cP)	Temperatura de empastamiento (PT) (°C)
Sin Fortificar (SF)	1428 ± 20 <sup>a</sup>	1318 ± 21 <sup>a</sup>	111 ± 7 <sup>a</sup>	2321 ± 39 <sup>a</sup>	1004 ± 18 <sup>a</sup>	74 ± 1 <sup>a</sup>
Fortificado (F)	734 ± 27 <sup>b</sup>	690 ± 31 <sup>b</sup>	43 ± 8 <sup>b</sup>	1138 ± 30 <sup>b</sup>	448 ± 3 <sup>b</sup>	80 ± 5 <sup>b</sup>

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) ( $n=3$ ).

Dado que la materia seca de la papa contiene además del almidón polisacáridos no amiláceos, proteínas, azúcares libres y otros componentes menores, estos componentes no amiláceos interactúan con el agua y limitan el hinchamiento del almidón, haciendo que los valores obtenidos para los chips sean inferiores a los valores de viscosidad obtenidos para almidón de papa puro (Liu et al., 2007).

La figura 45, representa los perfiles de empastamiento para almidón de papa (A) y materia seca de la papa (B) encontrados por Qiang Liu et al., (2007) para papa variedad Russet, donde se observa que la caída de la viscosidad forma un “*pico*”, típico para almidones nativos, incluido el almidón de papa (E. Kim & Kim, 2015; Singh & Kaur, 2016). En este estudio, los perfiles de empastamiento se aproximan al comportamiento de la materia seca de la papa más que al almidón de papa puro, debido a su composición (tabla 12). Sin embargo, tanto los chips fortificados (F) como sin fortificar (SF) mostraron ausencia de “*pico*” a la viscosidad máxima durante el calentamiento, esto se debe a que ambas muestras (F y SF) fueron sometidas a tratamientos térmicos (escaldado y deshidratación), ocasionando la gelatinización parcial del almidón (Rosales-Soto et al., 2016), causando cambios estructurales, como lixiviación de amilosa, y la formación de una matriz compacta de amilosa y amilopectina fundidas (Chen et al., 2018), por lo que el desarrollo de la viscosidad se vio afectado por estos tratamientos. El almidón procesado por cocción presenta menor viscosidad y mayor solubilidad que el almidón nativo (Tharanathan, 2005). De igual forma, Álvarez, (2014) presentó valores menores de viscosidad para harinas cocidas de Plátanos Guayabo y Hartón respecto a las harinas crudas.

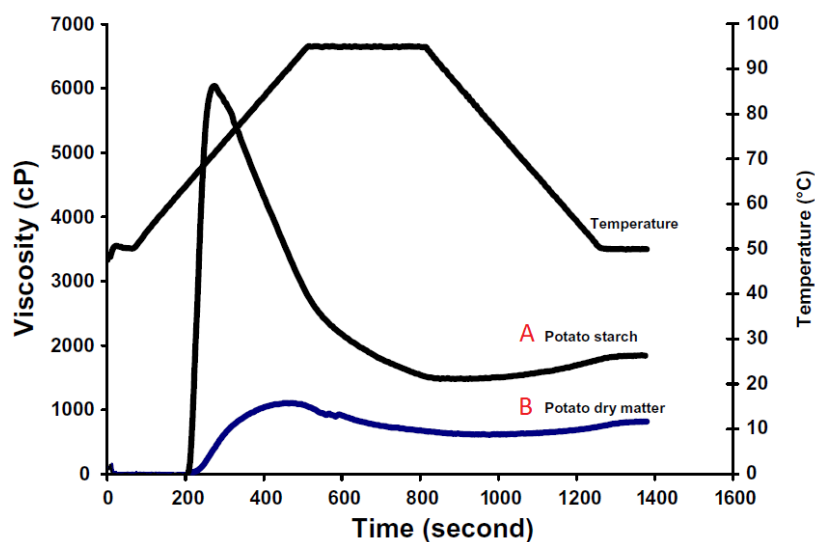


Figura 45. Perfiles de empastamiento para almidón de papa (A) y materia seca de la papa (B). Tomado de Qiang Liu et al., (2007).

La fortificación disminuyó significativamente el pico de viscosidad máxima (PV) de las muestras, el cual se refiere a la máxima viscosidad alcanzada durante el calentamiento

(Balet et al., 2019) de  $1428 \pm 20$  cP (SF) a  $734 \pm 27$  cP (F) ( $p < 0,05$ ) (anexo 10). Dicha afirmación se puede asumir debido a que la única diferencia entre las muestras F y SF es la adición de las vitaminas C y E y el calcio, teniendo como consecuencias que los valores bajos de viscosidad desarrollados por las muestras F pueden ser debidas a la presencia de estos compuestos actuando como barreras estructurales, restringiendo el hinchamiento (Do et al., 2019). La reducción en la viscosidad pico debido a la adición de calcio ha sido previamente reportada por Noda et al., (2014) en la fortificación de almidón de papa; donde el calcio (catión divalente) parecía afectar las propiedades de empastamiento del almidón, presumiblemente por reticulación iónica de los ésteres de fosfato de almidón (Noda et al., 2015). También, las paredes celulares intactas del parénquima de la papa, parecen retardar o inhibir el hinchamiento de los gránulos de almidón, así como restringir la lixiviación de amilosa a partir de los mismos (E. Kim & Kim, 2015), mientras que los complejos amilosa-lípidos también limitan el poder de hinchamiento (Balet et al., 2019; Robles Oñate, 2012).

El índice de inestabilidad del gel (BD), se considera como una medida del grado de desintegración de los gránulos o la estabilidad de la pasta (Kaur et al., 2007; Noda et al., 2014), lo cual implica que las papas fortificadas (F) tienen gránulos de almidón menos alterados. Por su parte, el índice de estabilidad del gel (SB) representa la estabilidad de la pasta de almidón después del enfriamiento, lo cual indica reasociación de las moléculas de amilosa lixiviadas de los gránulos después del hinchamiento (Zaidul et al., 2007; Zhou et al., 2016); estos resultados indican que los chips F tienen una baja velocidad de retrogradación o menor tendencia a retrogradar.

Finalmente, la temperatura de empastamiento (PT), refleja la energía requerida para la desintegración estructural y la formación de la pasta (Villanueva et al., 2019). Durante el empastamiento, la ruptura total de los gránulos de almidón toma lugar a una temperatura superior a la temperatura de gelatinización (Balet et al., 2019), que para esta variedad de papa fue encontrada ser de  $66,81 \pm 2,02$  °C (Figura 23). La mayor temperatura de empastamiento desarrollada por los chips F podría ser relacionada con el mayor esfuerzo necesario para que el agua actúe como plastificante y rompa los enlaces intermoleculares de las moléculas de

amilosa y amilopectina, por lo tanto se requirió más calor para desintegrar la estructura (Yassaroh et al., 2019).

#### 4.4.2.4 Poder de hinchamiento y solubilidad

La figura 46 muestra el poder de hinchamiento y solubilidad de los chips fortificados y sin fortificar y el anexo 11 presenta las tablas ANOVA y pruebas de múltiples rangos para estas dos propiedades evaluadas. La hidratación y el hinchamiento del almidón durante el calentamiento refleja la magnitud de las interacciones entre las cadenas de almidón dentro de los dominios amorfo y cristalino (Singh et al., 2006). Las muestras sin fortificar (SF), mostraron significativamente mayor poder de hinchamiento ( $11,36 \pm 0,32 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) comparadas con las muestras fortificadas (F) ( $8,59 \pm 0,07 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) (anexo 11). Este resultado es consistente con las propiedades de empastamiento. El menor poder de hinchamiento de las muestras fortificadas puede ser presumiblemente atribuido, como se discutió en el numeral anterior, a la acción de las paredes celulares bloqueando el hinchamiento y lixiviación de amilosa, la formación de complejos amilosa-lípidos y/o la unión del calcio con los ésteres fosfato (Balet et al., 2019; E. Kim & Kim, 2015; Noda et al., 2015; Robles Oñate, 2012), ya que se ha reportado que los grupos éster fosfato cargados negativamente dentro de los gránulos de almidón son responsables del alto poder de hinchamiento de los almidones de papa (Singh et al., 2007).

Por su parte, la solubilidad en la papa ha sido reportado ser principalmente debida al hinchamiento y solubilidad de los gránulos de almidón (Singh et al., 2003) y generalmente el mayor poder de hinchamiento es correlacionado con mayor solubilidad (Singh, Kaur, & McCarthy, 2007), el aumento de la solubilidad se ve principalmente como resultado del hinchamiento granular, lo que permite la exudación de la amilosa, los gránulos se vuelven cada vez más susceptibles a la desintegración a medida que se hinchan y liberan material soluble a medida que se desintegran (Singh & Kaur, 2016); estos sólidos solubles incluyen carbohidratos de bajo peso molecular (Ávarez, 2014).

A pesar de que la posible relación amilosa-lípidos forma un complejo insoluble (Fernando Flores, 2014), que disminuye el hinchamiento y solubilidad, se observa que, de forma contraria, las muestras fortificadas (F) tuvieron significativamente mayor solubilidad ( $15,65 \pm 0,07$  %), respecto a las muestras sin fortificar (SF) ( $10,30 \pm 0,29$  %) ( $p < 0,05$ ) (anexo 11). Este comportamiento, podría ser atribuido a la adición de calcio en forma de sal soluble, ya que, el lactato de calcio tiene una solubilidad relativamente más alta en comparación con otras sales de calcio (Alzamora et al., 2005). Esto es relevante teniendo en cuenta que el contenido de calcio adicionado en la formulación de la emulsión de impregnación fue superior ( $0,9$  %  $\text{Ca}^{2+}$ ) al contenido de vitamina E adicionado ( $0,2$  %), lo que podría explicar el efecto superior del mineral.

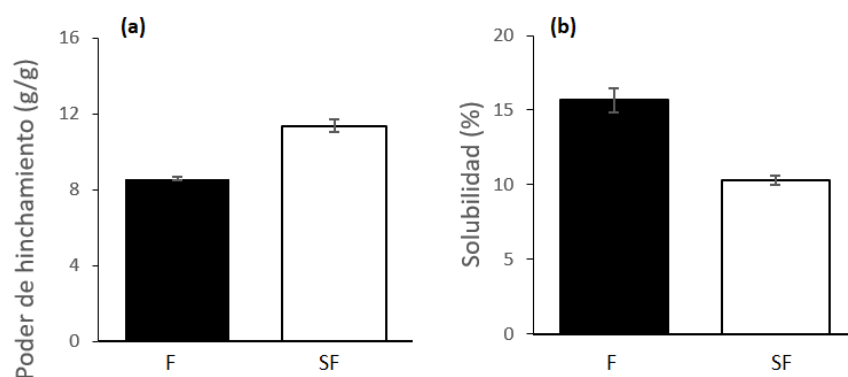


Figura 46. Poder de hinchamiento (a) y Solubilidad (b) de los chips de papa fortificados (F) y sin fortificar (SF). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=3$ ).

#### 4.4.2.5 Índice glucémico estimado

El índice glucémico (GI), es una medida de qué tanto y qué tan rápido un alimento particular eleva los niveles de glucosa en sangre (Singh & Kaur, 2016), tomando la glucosa o el pan blanco como alimento de referencia, al cual se le asigna un valor de 100 (Chen et al., 2018; Singh & Kaur, 2016). Aunque el índice glucémico estimado (eGI) ha mostrado ser significativamente correlacionado con el índice glucémico (GI) (Goñi et al., 1997), existen muchos factores como composición, procesamiento, textura, microestructura, tamaño de partícula, propiedades de la pared celular, almacenamiento entre otros, que determinan el grado de digestión del almidón y la absorción de sus productos de hidrólisis (Nayak et al.,

2014; Singh & Kaur, 2016; Tian et al., 2016; Yaman, Sargin, & Mızrak, 2019). El índice glucémico estimado (eGI) para los chips fortificados fue ligeramente pero significativamente menor ( $72,70 \pm 1,47$ ) que el eGI para los chips sin fortificar ( $83,94 \pm 1,99$ ) ( $p < 0,05$ ) (anexo 12), esto se relaciona con la menor tasa de hidrólisis de los chips fortificados discutida anteriormente.

En ese sentido Mason, Rasmussen, van Loon, Salmon, & Wadley, (2019), encontraron que la suplementación con ácido ascórbico condujo a disminuir significativamente la respuesta de glucosa posprandial en individuos con diabetes tipo 2, y aunque el mecanismo no fue confirmado, plantean la hipótesis de que la respuesta se produjo al disminuir el estrés oxidativo. Por lo tanto, la fortificación de la papa con esta vitamina es una alternativa promisoriosa para el desarrollo de alimentos con potenciales beneficios para la salud.

Por otro lado, de acuerdo a su GI, los alimentos pueden ser clasificados como *alto GI* ( $GI > 70$ ), *medio GI* ( $56 < GI < 69$ ) y *bajo GI* ( $GI < 55$ ) (ISO, 2010). Se ha reportado que las papas tienen valores mayores de GI que otros alimentos (Singh & Kaur, 2016), ya que la alta resistencia a la digestión enzimática del almidón de papa cruda se pierde con la gelatinización (Ek, Brand-Miller, & Copeland, 2012). Por lo tanto, la digestibilidad del almidón mejora con el procesamiento por lo que es afectada por los métodos de cocción (Tahvonen et al., 2006). Debido a la gran extensión de la gelatinización en las papas hervidas (sometidas a ebullición) pruebas *in vitro* e *in vivo* han demostrado que éstas tienen los mayores GI (Tian et al., 2016), por lo que, en general se aconseja a los pacientes con diabetes disminuir el consumo de papas cocidas (Ek et al., 2012; Singh & Kaur, 2016). Por su parte, las papas horneadas y deshidratadas han presentado menores valores de GI, que van de intermedio a alto (Nayak et al., 2014). Esto es debido a que en su composición, las papas contienen suficiente agua para permitir la gelatinización completa de su contenido de almidón durante los tratamientos con calor (Tahvonen et al., 2006), por lo tanto, es de esperarse pequeñas diferencias entre productos procesados de papa convencionalmente. Sin embargo, enfriar las papas después de cocinarlas produce menores valores GI, lo que se ha relacionado con la retrogradación de

la amilosa y el aumento del contenido de almidón resistente durante el enfriamiento (Chen et al., 2018; Singh & Kaur, 2016).

A pesar de que en este estudio tanto las papas F como SF presentaron valores altos de GI (>70), de acuerdo con estos hallazgos, se podrían evaluar otras condiciones de escaldado para disminuir el grado de gelatinización del almidón, así como etapas de enfriado antes del procesamiento por microondas con el fin de favorecer la formación de almidón resistente y de esta forma, disminuir el grado general de hidrólisis y por ende, el índice glucémico estimado. Predecir y controlar la absorción de glucosa como consecuencia de la ingestión de productos amiláceos es de gran importancia e interés en el contexto de las preocupaciones mundiales de salud (Singh et al., 2010).

#### 4.4.2.6 Características microestructurales de la digesta

La figura 47 muestra la microestructura de los chips fortificados (F) y sin fortificar (SF) antes y durante la digestión *in vitro* del almidón. La muestra sin fortificar y sin digerir (47a) exhibió células llenas de remanentes de gránulos de almidón, generados a través de la disrupción celular durante el escaldado y el secado por microondas; mientras que en la muestra fortificada sin digerir (47b), estos remanentes no fueron observados y su ausencia es probablemente el resultado de la inmersión de la muestra en la emulsión de fortificación (esto es, durante el proceso IV) y posterior deshidratación. Sin embargo, en ambas muestras el parénquima del tubérculo de la papa mostró un contorno de pared celular retenida definido después de los tratamientos (escaldado y secado, con y sin fortificación). Eso fue evidenciado previamente por Bordoloi, Kaur, et al., (2012) después de la cocción de variedades de papa comercializadas en Nueva Zelanda. También, puede verse algunas hendiduras y arrugas en la superficie que podrían ser causadas durante el proceso de liofilización (Bordoloi, Singh, et al., 2012).



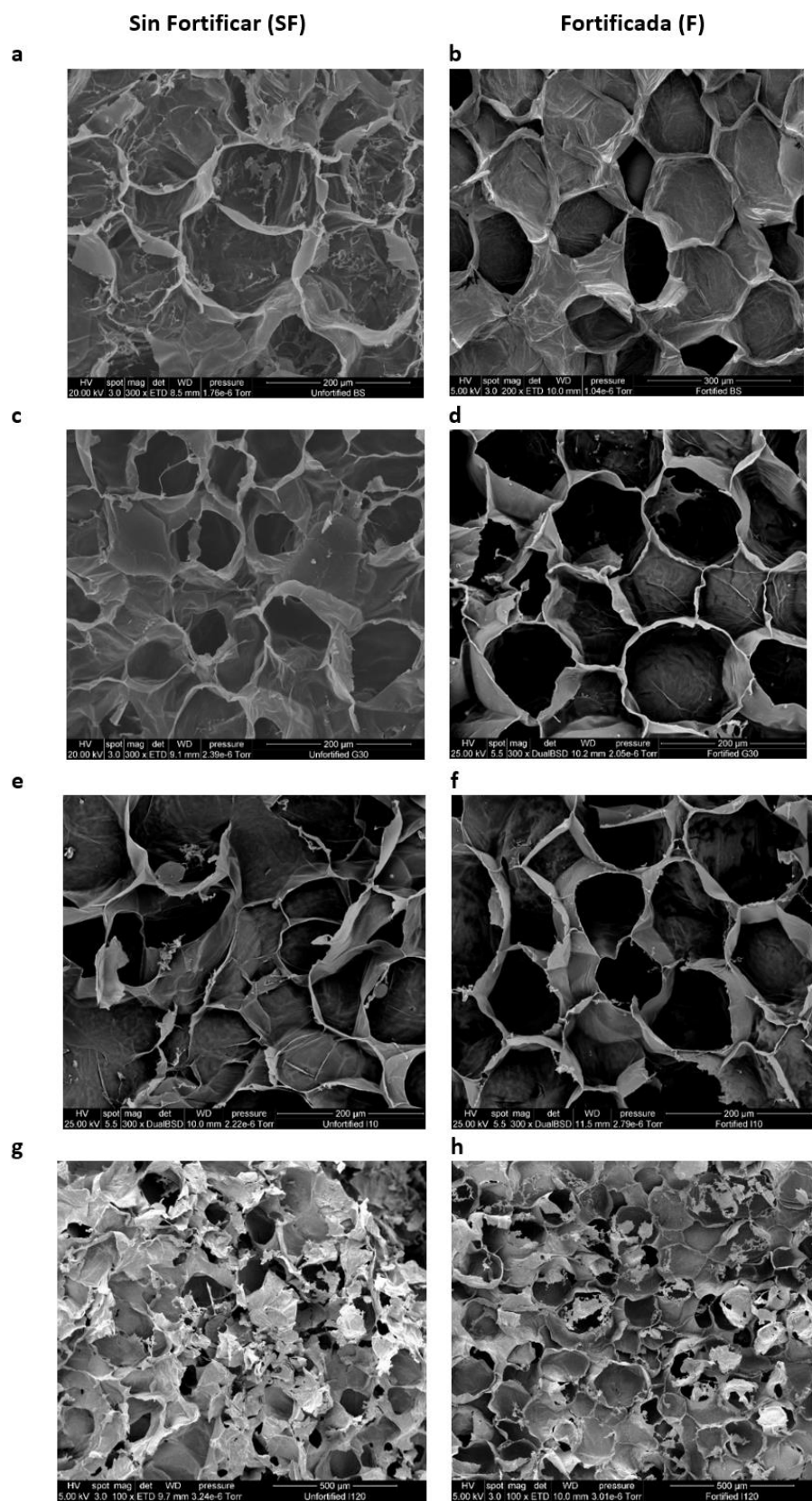


Figura 47. Micrografías SEM de chips sin fortificar (SF) (a, c, e, g) y fortificados (F) (b, d, f h): antes de empezar la digestión (a, b); y después de las etapas G30 (c, d); I10 (e, f) e I120 (g, h).

Después de 30 min de digestión gástrica, las micrografías (47c, 47d) mostraron pequeñas diferencias comparadas con las muestras sin digerir; se observan pequeñas estructuras filamentosas que podrían representar restos celulares, glicoproteínas o polisacáricos (Tian et al., 2016). Esto se debe a que la mayoría del almidón permaneció sin digerir, debido a la ausencia de amilasas en el fluido gástrico, como se evidenció en los bajos porcentajes de hidrólisis de almidón reportados en el numeral 4.4.2.2. El mismo comportamiento ha sido reportado durante la digestión gástrica de otros productos amiláceos tales como arroz (Tamura et al., 2016b), papa dulce (Ketnawa et al., 2019) y maíz (Dartois et al., 2010). Después de 10 min de digestión intestinal, la acción de las enzimas condujo al inicio de la hidrólisis de almidón, como se evidencia en las células con fondo homogéneo, y con indicios de ruptura celular (47e). Se observa, además, que los cambios microestructurales en la muestra fortificada (47f) son menores comparados con la muestra sin fortificar.

La muestra fortificada mostró la pared celular bien preservada, la cual está formada por la lamela media (Figura 43) - principalmente compuesta de sustancias pécticas- y la pared celular primaria -hecha de celulosa, hemicelulosa, glicanos y pectinas- (Andersson et al., 1994; Bordoloi, Kaur, et al., 2012; Bordoloi, Singh, et al., 2012). Luego de 120 min de digestión intestinal, se observa que los cambios microestructurales en las muestras fortificadas (47h) no fueron tan severos como los observados en las muestras sin fortificar (47g), ya que la pared celular de las muestras fortificadas mostró menos ruptura que las muestras sin fortificar. De acuerdo con esto, se puede decir que en este caso la pared celular jugó un rol importante influenciando la hidrólisis de almidón durante la digestión, como ha sido previamente establecido en otros estudios (Singh, Kaur, & Singh, 2013; Tian, Chen, et al., 2018).

En función de lo anterior, la adición de calcio en la emulsión de fortificación pudo mejorar la firmeza del tejido, a través de la formación de pectatos de calcio (Andersson et al., 1994), haciendo la pared celular más fuerte y por lo tanto, actuando como una barrera efectiva que afectó tanto el libre acceso o penetración de las enzimas digestivas, como la difusión de los carbohidratos hacia afuera de las células (Tian, Ogawa, et al., 2018),

disminuyendo de esta forma el porcentaje total de hidrólisis de almidón. Por lo tanto, estos resultados pueden ser objeto de mayor análisis o de estudios posteriores.

#### 4.4.3 Estimación de la bioaccesibilidad de los compuestos adicionados

La tabla 14 muestra los porcentajes de bioaccesibilidad obtenidos para los diferentes compuestos adicionados tanto en los chips fortificados (F) como sin fortificar (SF); adicionalmente, se presenta la cantidad correspondiente del compuesto liberado.

Tabla 14. Bioaccesibilidad de compuestos fortificantes.

		Bioaccesibilidad (%)	CFA liberado (mg/100 g ss)
<b>Calcio</b>	<b>SF</b>	43,6 ± 1,7 <sup>c</sup>	20,0 ± 0,8 <sup>d</sup>
	<b>F</b>	58,3 ± 0,7 <sup>d</sup>	520,5 ± 6,2 <sup>f</sup>
<b>Vitamina C</b>	<b>SF</b>	42,3 ± 0,7 <sup>c</sup>	11,2 ± 2,9 <sup>c</sup>
	<b>F</b>	14,0 ± 0,3 <sup>b</sup>	40,5 ± 6,1 <sup>e</sup>
<b>Vitamina E</b>	<b>SF</b>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>
	<b>F</b>	15,8 ± 1,6 <sup>b</sup>	5,8 ± 0,6 <sup>b</sup>

SF: Sin Fortificar; F: Fortificado.

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) ( $n=3$ ).

##### 4.4.3.1 Estimación de la bioaccesibilidad del calcio

Como se puede observar en la tabla 14, la bioaccesibilidad del calcio en los chips fortificados fue de  $58,3 \pm 0,7$  %, lo que significa que de una porción de 100 g de chips (ss) aproximadamente 520 mg de calcio fueron liberados. Por su parte, la bioaccesibilidad del calcio naturalmente presente en los chips (sin fortificar) fue de  $43,6 \pm 1,7$  %, es decir, aproximadamente 20 mg de calcio fueron liberados para una misma porción de alimento. Cabe señalar que a pesar de que el porcentaje de bioaccesibilidad fue similar, éste corresponde a valores de calcio muy diferentes, por lo que la fortificación con calcio incrementó de manera significativa el contenido de calcio presente en los chips y posteriormente liberado de los mismos.

La bioaccesibilidad del calcio es reportada en términos de calcio dializable o calcio soluble (Janve & Singhal, 2018). Algunas investigaciones han reportado porcentajes de bioaccesibilidad de fuentes de calcio de 19 – 35 % (calcio dializable) en matrices lácteas a base de suero, formuladas con diferentes fuentes de calcio (Lorieau et al., 2018); Galán, González, & Drago, (2014) reportaron porcentajes de bioaccesibilidad de calcio entre 11 – 23 % para arroz, lentejas y fideos, crudos y cocidos; Janve & Singhal, (2018) reportaron porcentajes entre 10 – 32 % (calcio soluble) en extruídos de arroz inflado y fideos de arroz fortificado con diferentes sales de calcio.

Con respecto a la biodisponibilidad, se reporta que de un 10 a 40 % del calcio que se consume se absorbe a través del intestino delgado, de una dieta variada en un adulto sano, y el resto se elimina en las heces (Badui, 2006; Botero, 2008). Los productos lácteos son una excelente fuente de calcio y pueden proporcionar acerca del 70 % de los requerimientos de este mineral (Lorieau et al., 2018). Los platos de leguminosas y cereales presentan los mejores resultados de calcio biodisponible mientras que los de carne y pescado poseen una menor biodisponibilidad para este mineral (Cámara Martos, 2004). En general, el aumento de las necesidades en el crecimiento, el embarazo, la lactancia y grados de ejercicio que originan una densidad ósea elevada incrementan la absorción de calcio (Casim, 2011). El principal requisito para la absorción del calcio es que debe estar presente en el tracto gastrointestinal en forma hidrosoluble y no precipitado (Casim, 2011). Además, diversos factores favorecen la absorción de calcio, tales como vitamina D (ingesta adecuada y/o su síntesis por exposición solar), lisina, arginina, la lactosa, inulina y pH ácidos (Badui, 2006).

Por el contrario, dentro de los factores desfavorables para la absorción de calcio están las dietas altas en grasas y bajas en vitamina D, la presencia de alcohol, así como la inmovilidad del individuo (Badui, 2006), el estrés mental o físico y el envejecimiento (la eficiencia de la acción de las hormonas implicadas en la absorción tiende a disminuir con la edad, reduciéndose hasta el 15 - 20 %) (Casim, 2011).

#### 4.4.3.2 Estimación de la bioaccesibilidad de la vitamina C

Como se muestra en la tabla 14, la bioaccesibilidad de la vitamina C en los chips fortificados fue de  $14,0 \pm 0,3$  %, lo que significa que de una porción de 100 g de chips (ss) aproximadamente 40,5 mg de vitamina C fueron liberados. Por su parte, la bioaccesibilidad de la vitamina C naturalmente presente en los chips (sin fortificar) fue de  $42,3 \pm 0,7$  %, es decir, aproximadamente 11,2 mg de vitamina C fueron liberados para una misma porción de alimento. A pesar de la alta termolabilidad de esta vitamina, el porcentaje de bioaccesibilidad en los chips sin fortificar fue elevado, y el menor porcentaje de bioaccesibilidad en los chips fortificados puede deberse a que la vitamina C utilizada en la fortificación, al ser exógena, probablemente está más propensa a sufrir pérdidas durante la simulación gastrointestinal. Sin embargo, a pesar de que el porcentaje de bioaccesibilidad de la vitamina C fue mayor en los chips sin fortificar, el menor porcentaje en los chips fortificados representa más mg de vitamina C extraídos de la matriz.

Algunas investigaciones han reportado porcentajes de bioaccesibilidad de vitamina C muy variables, entre estas, Espín, (2012) reportó porcentajes entre 86 – 97 % en la vitamina C de papas crudas y 57 – 88 % en papas procesadas (horneadas, fritas y cocidas), reflejando gran variabilidad por efecto de la variedad de papa. Rodríguez-Roque et al., (2015) reportaron porcentajes de 11 – 23 % para bebidas de jugos de fruta en agua y en leche. Brandon et al., (2014) reportaron porcentajes de bioaccesibilidad entre 0,1 – 99 % de vitamina C en suplementos dietarios, 0,3 – 1,4 % en fórmulas infantiles y 0,4 – 4,4 % en alimentos fortificados. Finalmente, Aschoff et al., (2015) reportaron la bioaccesibilidad de vitamina C en jugo de naranja alrededor de 78 %, estableciendo que la concentración en la digestión intestinal era más bien una demostración de la estabilidad de la vitamina durante la digestión que la bioaccesibilidad.

Con respecto a la biodisponibilidad, para el ácido ascórbico depende de dos factores importantes, la cantidad y el tiempo en que se consume (debido a su rápida degradación); la tasa de absorción es elevada y puede llegar a 85 % cuando ocurre en el intestino delgado a través de un transporte activo; sin embargo, cuando existen concentraciones altas el

transporte activo se satura dando paso solamente a un transporte pasivo disminuyendo así su absorción hasta un 15 % (Espín, 2012). En general, la biodisponibilidad oscila entre 80 - 100 %.

Dentro de los factores que favorecen la absorción de vitamina C están los flavonoides (Espín, 2012). Además, esta vitamina ayuda en la absorción intestinal del hierro, por lo que es fundamental en la dieta de los pueblos que basan su alimentación en granos y semillas (Badui, 2006). A diferencia de las vitaminas liposolubles, el hombre tiene una capacidad limitada para almacenar las vitaminas hidrosolubles, por lo que requiere un consumo continuo (Badui, 2006). Algunas condiciones fisiológicas incrementan la biodisponibilidad del ácido ascórbico, tal es el caso de los fumadores, los alcohólicos, los niños y las mujeres lactantes, que requieren de un mayor consumo (Badui, 2006; Espín, 2012).

#### 4.4.3.3 Estimación de la bioaccesibilidad de la vitamina E

La bioaccesibilidad de la vitamina E en los chips fortificados fue de  $15,8 \pm 1,6$  %, lo que significa que de una porción de 100 g de chips (ss) aproximadamente 5,8 mg de vitamina E fueron liberados. Por su parte, dado que no se encontró vitamina E presente naturalmente en los chips, como era de esperarse, la bioaccesibilidad fue nula.

Algunas investigaciones han reportado porcentajes de bioaccesibilidad de vitamina E; Hossain & Jayadeep, (2018) reportaron porcentaje de bioaccesibilidad para los tocoferoles totales entre 42 - 78 % en maíz crudo y parcialmente cocinado; Mandalari et al., (2013) reportaron que más del 90 % del  $\alpha$ -tocoferol era bioaccesible en pistachos crudos y tostados; mientras que menores porcentajes fueron encontrados por Stinco et al., (2019) 33 -35 % en jugos de fruta con leche y Cheng, Fan, & Liu, (2020) 0,6 – 29 % en emulsiones estabilizadas con caseinato de sodio.

Con respecto a la biodisponibilidad de vitamina E, la eficiencia de absorción del tocoferol o sus ésteres varía con las condiciones fisiológicas y nutricionales, incluyendo el flujo de bilis y jugo pancreático y la naturaleza y cantidad de lípidos ingerida (Tomassi,

1986). El grado en que diferentes tocoferoles son absorbidos se ha reportado ser similar, aunque mayores porcentajes han sido observados para el  $\alpha$ -tocoferol y  $\gamma$ -tocoferol (Mandalari et al., 2013; Tomassi, 1986). Los ésteres de tocoferol son parcialmente hidrolizados por las esterasas intestinales antes de que sean absorbidos y son parcialmente absorbidos como ésteres intactos; el tocoferol acetato ha sido encontrado tener cerca del 90 % de la actividad biológica de la forma libre (Tomassi, 1986) e incluso otros estudios afirman que la actividad biológica es considerada igual (Lauridsen, Hedemann, & Jensen, 2001).

Dentro de los factores que favorecen la absorción de vitamina E están los triglicéricos de cadena media ya que su absorción está ligada a la simultánea digestión y absorción de la grasa alimentaria, habiéndose observado que éstos incrementan la absorción (Sayago et al., 2007). Estudios en animales y humanos han mostrado que la bilis y la secreción pancreática son esenciales para la hidrólisis de los triglicéricos por las lipasas pancreáticas facilitando así la absorción de la vitamina E (Sayago et al., 2007).

Por el contrario, un incremento en la ingesta de ácidos grasos poliinsaturados, o su conjunta administración con sales ferrosas interfiere con la digestión y absorción de la vitamina E (Teixidó, 2015).

#### 4.4.5 Relevancia de los resultados obtenidos

De acuerdo con los resultados obtenidos la fracción de dosis ingerida finalmente bioaccesible, es el resultado de un proceso de reducción paso a paso: esto es, pérdidas durante el secado y pérdidas durante el almacenamiento. Teniendo en cuenta la fracción bioaccesible encontrada en esta investigación para los compuestos fortificantes adicionados; el consumo de una porción de los chips de papa deshidratados y fortificados (35g) estaría aportando aproximadamente el 17,4 %, 22,5 % y 9,6 % del Valor Diario de Referencia (VDR) de consumo de nutrientes para el calcio, vitamina C y vitamina E respectivamente; comparado con los chips deshidratados sin fortificar que aportarían el 0,7 %, 6,23 % y 0 % VDR de calcio, vitamina C y vitamina E, respectivamente.

Adicionalmente, se encontró que a pesar de que los chips fortificados se encuentran dentro de la categoría de alimentos con alto índice glucémico ( $>70$ ), éstos poseen menor grado de hidrólisis de almidón, lo cual puede ser de utilidad para el desarrollo de alimentos con características glucémicas bajas.

Finalmente, no se encontraron diferencias entre el contenido de compuestos adicionados para las dos atmósferas de empaque utilizadas por lo que, según esto, no había necesidad de entrar en sobrecostos para la utilización de atmósferas modificadas; sin embargo, es importante evaluar su contenido durante un tiempos de almacenamiento mayor, así como realizar un estudio de vida útil del producto para estimar otras características importantes en este tipo de productos como son la textura y la humedad.



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede concluir que se cumplió el objetivo general planteado, logrando desarrollar una nueva alternativa de procesamiento para la papa variedad Diacol Capiro, basado en la impregnación al vacío y la deshidratación.

La papa variedad Diacol Capiro pretratada térmicamente tiene potencial uso para su elaboración en forma de chips deshidratados y fortificados, de acuerdo a las propiedades fisicoquímicas encontradas y los parámetros respuesta a la impregnación, resaltando su alto contenido de materia seca y porosidad efectiva, comparada con otras variedades de papa existentes.

La técnica de impregnación al vacío fue adecuada para llevar a cabo el proceso de fortificación de la papa, ya que permitió aumentar los niveles de calcio y vitaminas C y E naturalmente presentes en la misma. Además, se encontró que las condiciones óptimas de impregnación fueron presión de vacío 77,3 kPa, tiempo de vacío 3,0 min y tiempo de restauración 4,0 min; condiciones que pueden ser usadas en otros estudios de impregnación de papa permitiendo la incorporación de mayor cantidad de solutos, ya sea con el fin de fortificar o proporcionar características deseables en la papa.

Los tres procesos de secado evaluados: secado por aire caliente, liofilización y secado por microondas al vacío fueron métodos adecuados para la estabilización de compuestos fortificantes adicionados por impregnación al vacío a la papa, ya que todos ayudaron a conservar en mayor o menor grado los compuestos fortificantes, resultando en productos con mayor contenido respecto a la composición inicial. Sin embargo, se resalta el proceso de secado por microondas al vacío, ya que además de ayudar a retener los compuestos, fue un proceso que se llevó a cabo en tiempos más cortos y tuvo la mejor aceptabilidad sensorial, resultando en una técnica promisoría para el desarrollo de productos de papa con valor agregado.

El proceso de optimización de secado por microondas al vacío, permitió establecer las condiciones de secado que potenciaban la obtención de un producto deshidratado y fortificado con características fisicoquímicas (humedad y actividad acuosa), texturales (dureza y trabajo de crocancia), funcionales (capacidad antioxidante ORAC y FRAP) y nutricionales (lisina disponible y compuestos fortificantes) deseables; estas fueron presión absoluta de 4,0 kPa y densidad de potencia de  $1,7 \text{ W}\cdot\text{g}^{-1}$ .

En función de las mejores condiciones de secado por microondas al vacío, se logró establecer que los chips deshidratados y fortificados presentaron un menor porcentaje de hidrólisis de almidón, así como menor índice glucémico estimado, resaltando principalmente el efecto del calcio sobre las paredes celulares de las células de la papa, actuando como barrera protectora. Estos resultados sirven de base para el desarrollo de nuevos productos a partir de papa con características glucémicas bajas, posibilitando que a futuro las personas se vean beneficiadas de las características nutricionales que proporciona este tubérculo, sin que se relacione necesariamente su consumo con un índice glucémico alto.

Se resalta que la bioaccesibilidad es un aspecto muy importante a tener en cuenta cuando se trabaja con alimentos fortificados, por lo tanto, para optimizar la bioaccesibilidad, la reducción en cada etapa debe ser la mínima posible; en este estudio se encontró a través de la digestión *in vitro*, que parte de los compuestos fortificantes adicionados era liberado en el tracto gastrointestinal, lo cual, los hace potencialmente disponibles para su aprovechamiento por el organismo.

Finalmente se puede concluir que el uso combinado de la impregnación al vacío como técnica de fortificación y el secado por microondas al vacío son métodos convenientes para el desarrollo de un producto de papa con valor agregado, que sea una alternativa saludable a los chips de papa frita tradicionales y que además de ser bajo en grasa aporte nutrientes adicionales a través de su consumo; también, para el caso específico nacional, que permita aumentar la cadena de valor del cultivo de la papa en Colombia.

Como recomendaciones finales, está realizar el proceso de fortificación de cada compuesto de manera individual, para evaluar el efecto que tiene cada uno en la digestión *in vitro* del almidón, así como su bioaccesibilidad individual. Por otro lado, dado que la mayoría de las pérdidas de los compuestos fortificantes se producen durante la aplicación de los tratamientos térmicos como el secado, se podría evaluar el empleo de formas encapsuladas de las vitaminas que permitieran reducir los efectos negativos del oxígeno, el calor y la luz, permitiendo que una mayor fracción de vitaminas llegara a ser bioaccesible.

## 6. REFERENCIAS

- Abell, Andrew D., Maureen J. Ratcliffe, and Juliet Gerrard. 1998. "Ascorbic Acid-Based Inhibitors of  $\alpha$ -Amylases." *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters* 8(13):1703–6.
- Agnieszka, Nemś, and Pęksa Anna. 2018. "Polyphenols of Coloured-Flesh Potatoes as Native Antioxidants in Stored Fried Snacks." *Lwt*.
- AgrOfertas. 2018. "Bolsa Flex Up, Alico." *Industria Agroalimentaria. Empaques y Etiquetas*. Retrieved (<https://agrofertas.co/industria-agroalimentaria/empaques/empaques-flexibles/bolsa-flex-up-alico/>).
- Agronet. 2017. "Principales Departamentos Productores de Papa Ordenados Por Producción." Retrieved May 27, 2016 (<http://www.agronet.gov.co/>).
- Alvarez, María Dolores, Cristina Fernández, María Dolores Olivares, and Wenceslao Canet. 2012. "A Rheological Characterisation of Mashed Potatoes Enriched with Soy Protein Isolate." *Food Chemistry* 133(4):1274–82.
- Alzamora, Stella M., Daniela Salvatori, María S. Tapia, Aurelio López-Malo, Jorge Welti-Chanes, and Pedro Fito. 2005. "Novel Functional Foods from Vegetable Matrices Impregnated with Biologically Active Compounds." *Journal of Food Engineering* 67(1–2):205–14.
- Ambros, S., P. Foerst, and U. Kulozik. 2018. "Temperature-Controlled Microwave-Vacuum Drying of Lactic Acid Bacteria: Impact of Drying Conditions on Process and Product Characteristics." *Journal of Food Engineering* 224:80–87.
- Amjad, Waseem, Oliver Hensel, Anjum Munir, Albert Esper, and Barbara Sturm. 2016. "Thermodynamic Analysis of Drying Process in a Diagonal-Batch Dryer Developed for Batch Uniformity Using Potato Slices." *Journal of Food Engineering* 169:238–49.
- Andersson, Anders, Vassilis Gekas, Irene Lind, Fernanda Oliveira, and Rickard Öste. 1994. "Effect of Preheating on Potato Texture." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 34(3):229–51.
- Andre, Christele, Marc Ghislain, Pierre Bertin, Mouhssin Oufir, María Herrera, Lucien Hoffmann, Jean-Francois Hausman, Yvan Larondelle, and Danielle Evers. 2007. "Andean Potato Cultivars ( *Solanum Tuberosum* L .) as a Source of Antioxidant and Mineral Micronutrients." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55(2):366–78.
- Andre, Christelle, Mouhssin Oufir, Cédric Guignard, Lucien Hoffmann, Jean François Hausman, Danièle Evers, and Yvan Larondelle. 2007. "Antioxidant Profiling of Native Andean Potato Tubers (*Solanum Tuberosum* L.) Reveals Cultivars with High Levels of  $\beta$ -Carotene,  $\alpha$ -Tocopherol, Chlorogenic Acid, and Petanin." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55(26):10839–49.
- Andrés, Ana. 2015. "La Bioaccesibilidad Como Parámetro de Optimización de Procesos Alimentarios y Desarrollo de Nuevos Productos." Pp. 19–26 in *BIOECONOMIA ARGENTINA*. Vol. 1. Puerto Madryn, Argentina.
- AOAC. 2000. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 17th ed. Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Analytical Chemists.
- Aprajeeta, J., R. Gopirajah, and C. Anandharamakrishnan. 2015. "Shrinkage and Porosity Effects on Heat and Mass Transfer during Potato Drying." *Journal of Food Engineering* 144:119–28.

- Asard, H., J. M. May, and N. Smirnov. 2005. *Vitamine C Functions and Biochemistry in Animals and Plants*.
- Aschoff, Julian K., Sabrina Kaufmann, Onur Kalkan, Sybille Neidhart, Reinhold Carle, and Ralf M. Schweiggert. 2015. "In Vitro Bioaccessibility of Carotenoids, Flavonoids, and Vitamin C from Differently Processed Oranges and Orange Juices [ Citrus Sinensis (L.) Osbeck]." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63(2):578–87.
- Ávarez, Cristina. 2014. "Propiedades Reológicas De Frutos Y Masas De Plátanos Procesados Por Cocción y Su Relación Con La Modificación Del Almidón." Universidad del Valle.
- Ayala A, Alfredo A., Liliana Serna C, and Esmeralda S. Mosquera V. 2010. "Liofilización de Pitahaya Amarilla (Selenicereus Megalanthus)." *Vitae* 17(2):121–27.
- Azzollini, D., A. Derossi, V. Fogliano, C. M. M. Lakemond, and C. Severini. 2018. "Effects of Formulation and Process Conditions on Microstructure, Texture and Digestibility of Extruded Insect-Riched Snacks." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 45(September 2017):344–53.
- Badui Dergal, S. 2006. *Química de Los Alimentos*. 4th ed. Ciudad de México.
- Bai-Ngew, Swittra, Nantawan Therdthai, and Pisit Dhamvithee. 2011. "Characterization of Microwave Vacuum-Dried Durian Chips." *Journal of Food Engineering* 104(1):114–22.
- Balet, Sandra, Anina Guelpa, Glen Fox, and Marena Manley. 2019. "Rapid Visco Analyser (RVA) as a Tool for Measuring Starch-Related Physicochemical Properties in Cereals: A Review." *Food Analytical Methods* 2344–60.
- Barba, Francisco J., Maria J. Esteve, and Ana Frigola. 2013. "Physicochemical and Nutritional Characteristics of Blueberry Juice after High Pressure Processing." *Food Research International* 50(2):545–49.
- Barbosa-Cánovas, Gustavo., Anthony Fontana, Shelly Schmidt, and Theodore Labuza. 2007. *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*. edited by I. PRESS. Ames, USA: BLACKWELL.
- Barbosa-Cánovas, Gustavo., and Albert. Ibarz. 2003. *Unit Operations in Food Engineering*. Washington D.C.: CRC Press.
- Barbosa-Cánovas, Gustavo., Enrique. Ortega-Rivas, Pablo. Juliano, and Hong Yan. 1997. "Chapter 11." Pp. 271–304 in *Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality*. New York: Plenum Publishers.
- Barbosa-Cánovas, Gustavo., and Humberto Vega-Mercado. 2000. *Deshidratación de Alimentos*. Ciudad de México: Acribia.
- Barona, Darío, Julián Mateus-Rodríguez, and Fabián Montesdeoca. 2012. *La Planta de Papa: Ecofisiología y Nutrición Mineral*.
- Barragán, P. 2011. "Potencial Saludable de Sustancias Bioactivas de Algunas Verduras." Pontificia Universidad Javeriana.
- Barreiro M, Jose A., and Alejandra J. Sandoval B. 2006. *Operaciones de Conservación de Alimentos Por Bajas Temperaturas*. Equinoccio.
- Barrera Puigdollers, Cristina. 2007. "Estudio de La Deshidratación Osmótica y Del Secado Por Aire Caliente Como Operaciones de Estabilización de Productos de Manzana (Var. Granny Smith)

Enriquecidos En Calcio.”

- Barreto, I. M. A., G. Tribuzi, A. Marsaioli Junior, B. A. M. Carciofi, and J. B. Laurindo. 2019. “Oil-Free Potato Chips Produced by Microwave Multiflash Drying.” *Journal of Food Engineering* 261(May):133–39.
- Barrientos, Juan Carlos, Camilo Rondón, and Sandra Melo. 2011. “Comportamiento de Precios de Las Variedades de Papa Parda Pastusa y Diacol Capiro En Colombia.” *Rev. Colomb. Cienc. Hortic* 8(2):272–86.
- Bartosz, Grzegorz. 2014. *Food Oxidants and Antioxidants*. Vol. 236. New York: CRC Press.
- Bash, Eleanor. 2015. “The Population Genetic Structure of *Rhizoctonia Solani* AG-3PT from Potatoes in the Colombian Andes.” *PhD Proposal* 1:1–34.
- Betalleluz, Indira. 2015. “Estudio Del Enriquecimiento de Manzana Con Prebióticos, Probióticos y Componentes Antioxidantes Provenientes de Zumo de Mandarina Por Impregnación a Vacío Para El Desarrollo de Aperitivos Altamente Funcionales y Con Bajo Contenido Calórico.” Universidad Politécnica de Valencia.
- Betoret, E., Enrique Sentandreu, and N. Betoret. 2017. “Technological Development and Functional Properties of an Apple Snack Rich in Flavonoid from Mandarin Juice.” *Innovative Food Science Anfile:///D:/PAPA DRIVE/Impregnación Al Vacío/18. TESIS UPV Manzana Con Prebióticos, Probióticos y Antioxidantes (1).Pdfd Emerging Technologies* 16(October 2012):298–304.
- Betoret, Ester, Noelia Betoret, Pietro Rocculi, and Marco Dalla Rosa. 2015. “Strategies to Improve Food Functionality: Structure-Property Relationships on High Pressures Homogenization, Vacuum Impregnation and Drying Technologies.” *Trends in Food Science and Technology* 46(1):1–12.
- Betoret, N., A. Andrés, L. Segui, and P. Fito. 2007. “Application of Safes (Systematic Approach to Food Engineering Systems) Methodology to Dehydration of Apple by Combined Methods.” *Journal of Food Engineering* 83(2):186–92.
- Biesalski, Hans Konrad, Lars Ove Dragsted, Ibrahim Elmadfa, Rolf Grossklaus, Michael Müller, Dieter Schrenk, Paul Walter, and Peter Weber. 2009. “Bioactive Compounds: Definition and Assessment of Activity.” *Nutrition* 25(11–12):1202–5.
- Birch, Paul R. J., Glenn Bryan, Brian Fenton, Eleanor M. Gilroy, Ingo Hein, John T. Jones, Ankush Prashar, Mark A. Taylor, Lesley Torrance, and Ian K. Toth. 2012. *Crops That Feed the World 8: Potato: Are the Trends of Increased Global Production Sustainable?* Vol. 4.
- Blé-Castillo, Jorge Luis, Juan C. Díaz-Zagoya, and José D. Méndez. 2008. “Suplementación Con Vitamina E, ¿benéfica o Dañina?” *Gaceta Medica de Mexico* 144(2):147–54.
- Bondaruk, Joanna, Marek Markowski, and Wioletta Błaszczak. 2007. “Effect of Drying Conditions on the Quality of Vacuum-Microwave Dried Potato Cubes.” *Journal of Food Engineering* 81(2):306–12.
- Borah, Pallab Kumar, Anwesha Sarkar, and Raj Kumar Duary. 2019. “Water-Soluble Vitamins for Controlling Starch Digestion: Conformational Scrambling and Inhibition Mechanism of Human Pancreatic  $\alpha$ -Amylase by Ascorbic Acid and Folic Acid.” *Food Chemistry* 288(March):395–404.
- Bordoloi, Achinta, Lovedeep Kaur, and Jaspreet Singh. 2012. “Parenchyma Cell Microstructure and

- Textural Characteristics of Raw and Cooked Potatoes.” *Food Chemistry* 133(4):1092–1100.
- Bordoloi, Achinta, Jaspreet Singh, and Lovedeep Kaur. 2012. “In Vitro Digestibility of Starch in Cooked Potatoes as Affected by Guar Gum: Microstructural and Rheological Characteristics.” *Food Chemistry* 133(4):1206–13.
- Botero, Ana Isabel. 2008. “Aplicación de La Ingeniería de Matrices En El Desarrollo de Uchuva Mínimamente Procesada Fortificada Con Calcio y Vitaminas C y E.” Universidad de Antioquia.
- Boukid, Fatma, Elena Vittadini, Federica Lusuardi, Tommaso Ganino, Eleonora Carini, Federico Morreale, and Nicoletta Pellegrini. 2019. “Does Cell Wall Integrity in Legumes Flours Modulate Physicochemical Quality and in Vitro Starch Hydrolysis of Gluten-Free Bread?” *Journal of Functional Foods* 59(May):110–18.
- Bradshaw, John E., Christiane Gebhardt, Francine Govers, Donald MacKerron, Mark Taylor, and Heather Ross. 2007. *Potato Biology and Biotechnology*. Vol. 1. edited by D. Vreugdenhil. Wageningen, The Netherlands: Elsevier.
- Brandon, E. F. A., M. I. Bakker, E. Kramer, H. Bouwmeester, T. Zuidema, and M. Alewijn. 2014. “Bioaccessibility of Vitamin A, Vitamin C and Folic Acid from Dietary Supplements, Fortified Food and Infant Formula.” *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 65(4):426–35.
- Caffall, Kerry Hosmer, and Debra Mohnen. 2009. “The Structure, Function, and Biosynthesis of Plant Cell Wall Pectic Polysaccharides.” *Carbohydrate Research* 344(14):1879–1900.
- Calliope, Sonia Rosario, Manuel Oscar Lobo, and Norma Cristina Sammán. 2018. “Biodiversity of Andean Potatoes: Morphological, Nutritional and Functional Characterization.” *Food Chemistry* 238:42–50.
- Cámara Martos, Fernando. 2004. “Biodisponibilidad Mineral de Menús Escolares.” Universidad de Córdoba.
- Cantwell, Brian, and Arif Karabeyoglu. 2014. “Recent Advances in Hybrid Drying Technologies.” Pp. 447–459 in *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. Vol. 9. Singapore: Elsevier Ltd.
- Cardoso, G. ..., and M. T. Jiménez. 2015. “Nanoemulsiones En Alimentos: Preparación y Aplicaciones.” *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 9:15–24.
- Carpetano, Beatriz. 2011. “Elaboración de Productos Funcionales de Manzana (Var. Granny Smith) Enriquecida Con Aloe Vera.” Universidad Politécnica de Valencia.
- Casim, Silvina Mariel. 2011. “Enriquecimiento de Manzana Con Calcio : Efecto En Las Propiedades Físico-Químicas y Estructurales Durante El Secado En Corriente de Aire.” Universidad de Buenos Aires.
- Castagnini, Juan Manuel. 2015. “Estudio Del Proceso de Obtención de Zumo de Arándanos y Su Utilización Como Ingrediente Para La Obtención de Un Alimento Funcional Por Impregnación a Vacío.” Universidad Politécnica de Valencia.
- Chafer, M., A. Chiralt, L. Perez-Cabrera, M. Chafer, A. Chiralt, and C. Gonzalez-Martinez. 2011. “Effectiveness of Antibrowning Agents Applied by Vacuum Impregnation on Minimally Processed Pear.” *LWT - Food Science and Technology* 44(10):2273–80.

- Chandramohan, V. P., and Prabal Talukdar. 2014. "Experimental Studies for Convective Drying of Potato." *Heat Transfer Engineering* 35(14–15):1288–97.
- Chen, Yu Fan, Jaspreet Singh, and Richard Archer. 2018. "Potato Starch Retrogradation in Tuber: Structural Changes and Gastro-Small Intestinal Digestion in Vitro." *Food Hydrocolloids* 84:552–60.
- Cheng, Hao, Qi Fan, and Tiancheng Liu. 2020. "Co-Encapsulation of  $\alpha$ -Tocopherol and Resveratrol in Oil-in-Water Emulsion Solubilized by Sodium Caseinate: Impact of Polysaccharide on the Stability and Bioaccessibility." *Journal of Food Engineering* 264.
- Chung, Hyun Jung, Dong Hoon Shin, and Seung Taik Lim. 2008. "In Vitro Starch Digestibility and Estimated Glycemic Index of Chemically Modified Corn Starches." *Food Research International* 41(6):579–85.
- CIP. 2019. "International Potato Center." *The Potato Plant*. Retrieved March 25, 2019 (<https://cipotato.org/es/potato/>).
- Ciro, Gelmy. 2012. "Conservación de Uchuva Basada En La Impregnación a Vacío de Extractos de Plantas Con Actividad Antimicrobiana y Antioxidante." Universidad de Antioquia.
- Codex Alimentarius. 1991. *Principios Generales Para La Adición de Nutrientes Esenciales a Los Alimentos*. Vol. 151.
- Colussi, Rosana, Lovedeep Kaur, Elessandra da Rosa Zavareze, Alvaro Renato Guerra Dias, R. B. Stewart, and Jaspreet Singh. 2018. "High Pressure Processing and Retrogradation of Potato Starch: Influence on Functional Properties and Gastro-Small Intestinal Digestion in Vitro." *Food Hydrocolloids* 75:131–37.
- Colussi, Rosana, Jaspreet Singh, Lovedeep Kaur, Elessandra da Rosa, Alvaro Guerra, Robert B. Stewart, and Harjinder Singh. 2017. "Microstructural Characteristics and Gastro-Small Intestinal Digestion in Vitro of Potato Starch: Effects of Refrigerated Storage and Reheating in Microwave." *Food Chemistry* 226:171–78.
- Contreras-Calderón, José, Lilia Calderón-Jaimes, Eduardo Guerra-Hernández, and Belén García-Villanova. 2011. "Antioxidant Capacity, Phenolic Content and Vitamin C in Pulp, Peel and Seed from 24 Exotic Fruits from Colombia." *Food Research International* 44(7):2047–53.
- Contreras-Calderón, José, Eduardo Guerra-Hernández, and Belén García-Villanova. 2009. "Utility of Some Indicators Related to the Maillard Browning Reaction during Processing of Infant Formulas." *Food Chemistry* 114(4):1265–70.
- Contreras-Calderón, José, Diana Mejía-Díaz, Marcela Martínez-Castaño, Daniel Bedoya-Ramírez, Natalia López-Rojas, Faver Gómez-Narváez, Yaqueline Medina-Pineda, and Oscar Vega-Castro. 2016. "Evaluation of Antioxidant Capacity in Coffees Marketed in Colombia: Relationship with the Extent of Non-Enzymatic Browning." *Food Chemistry* 209:162–70.
- Contreras Monzón, Carolina. 2006. "Influencia Del Método de Secado En Parámetros de Calidad Relacionados Con La Estructura y El Color de Manzana y Fresa Deshidratadas." Universidad Politécnica de Valencia.
- Copeland, Les, Jaroslav Blazek, Hayfa Salman, and Mary Chiming Tang. 2009. "Form and Functionality of Starch." *Food Hydrocolloids* 23(6):1527–34.
- Cortés-Rodríguez, Misael, Yudy Cabrera, and Rodrigo Ortega-Toro. 2018. "Effect of Storage of Hot Air Dried Cape Gooseberry Added with Physiologically Active Components by Vacuum



- Impregnation.” *Revista U.D.C.A.* 21(2):427–37.
- Cortés, M., A. Osorio, and E. García. 2007. “Air Dried Apple Fortified with Vitamin E Using Matrix Engineering.” *Vitae* 14(2):17–26.
- Cortés, Misael. 2004. “Desarrollo de Productos de Manzana Deshidratados Enriquecidos Con Vitamina E.” Universidad Politécnica de Valencia.
- Cortés, Misael, Amparo Chiralt, and Luis Puente. 2005. “Alimentos Funcionales: Una Historia Con Mucho Presente y Futuro.” *VITAE, Revista de La Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias* 12(1).
- Cortés, Misael, Andrea García, and Hector Suárez. 2007. “Fortificación De Hongos Comestibles Con Calcio, Selenio y Vitamina C.” *VITAE, Revista de La Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias* 14(1):16–24.
- Cortés, Misael, Edgar Herrera, and Eduardo Rodríguez. 2015. “Optimización Experimental Del Proceso de Liofilización de Uchuva Adicionada Con Componentes Activos Por Impregnación Al Vacío.” *VITAE, Revista de La Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias* 47–56.
- Cortés, Misael, Alexander Osorio, and Eduard García. 2007. “Manzana Deshidratada Fortificada Con Vitamina E Utilizando La Ingeniería de Matrices.” *VITAE, Revista de La Facultad de Química Farmacéutica* 14(2):17–26.
- Cortés R, Misael, and Amparo Chiralt B. 2008. “Cinética de Los Cambios de Color En Manzana Deshidratada Por Aire Fortificado Con Vitamina E.” *Revista de La Facultad Química Farmaceutica* 15(1):8–16.
- Cui, Li, Li ying Niu, Da jing Li, Chun quan Liu, Ying ping Liu, Chun ju Liu, and Jiang feng Song. 2018. “Effects of Different Drying Methods on Quality, Bacterial Viability and Storage Stability of Probiotic Enriched Apple Snacks.” *Journal of Integrative Agriculture* 17(1):247–55.
- Cui, Zheng-Wei, Shi-Ying Xu, and Da-Wen Sun. 2004. “Microwave-Vacuum Drying Kinetics of Carrot Slices.” *Journal of Food Engineering* 65(2):157–64.
- Dartois, Anne, Jaspreet Singh, Lovedeep Kaur, and Harjinder Singh. 2010. “Influence of Guar Gum on the in Vitro Starch Digestibility-Rheological and Microstructural Characteristics.” *Food Biophysics* 5(3):149–60.
- Darvishi, Hosain. 2012. “Energy Consumption and Mathematical Modeling of Microwave Drying of Potato Slices.” *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 14(1):94–102.
- Derossi, A., T. De Pilli, and C. Severini. 2012. “The Application of Vacuum Impregnation Techniques in Food Industry.” Pp. 26–56 in *Scientific, Health and Social Aspects of the Food Industry*, edited by B. Valdez. London: IntechOpen.
- Dhital, Sushil, Ashok K. Shrestha, and Michael J. Gidley. 2010. “Relationship between Granule Size and in Vitro Digestibility of Maize and Potato Starches.” *Carbohydrate Polymers* 82(2):480–88.
- Díaz Uribe, Carlos E., and William Vallejo. 2015. “Análisis de La Distribución Del Tamaño de Partícula de Agregados de Porfirinas Por Dispersión Dinámica de Luz.” *Elementos* 5(5).
- Do, Duc Toan, Jaspreet Singh, Indrawati Oey, and Harjinder Singh. 2019. “Modulating Effect of Cotyledon Cell Microstructure on in Vitro Digestion of Starch in Legumes.” *Food*

*Hydrocolloids* 96:112–22.

- Dourado, Cátia, Carlos Pinto, Francisco J. Barba, Jose M. Lorenzo, Ivonne Delgadillo, and Jorge A. Saraiva. 2019. “Innovative Non-Thermal Technologies Affecting Potato Tuber and Fried Potato Quality.” *Trends in Food Science and Technology* 88(February):274–89.
- Du, Guorong, Mingjun Li, Fengwang Ma, and Dong Liang. 2009. “Antioxidant Capacity and the Relationship with Polyphenol and Vitamin C in Actinidia Fruits.” *Food Chemistry* 113(2):557–62.
- Duarte, Y., A. Chaux, N. Lopez, E. Largo, C. Ramírez, H. Nuñez, R. Simpson, and O. Vega. 2017. “Effects of Blanching and Hot Air Drying Conditions on the Physicochemical and Technological Properties of Yellow Passion Fruit (*Passiflora Edulis* Var. *Flavicarpa*) by-Products.” *Journal of Food Process Engineering* 40(3):0–9.
- Dyer, Davis, Frederick Daizell, and Rowena Olegario. 2005. *Procter & Gamble (Rising Trade)*. Bogotá: Norma.
- Eitenmiller, Ronald, and Junsoo Lee. 2004. *Vitamin E, Food Chemistry, Composition and Analysis*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Ek, Kai Lin, Jennie Brand-Miller, and Les Copeland. 2012. “Glycemic Effect of Potatoes.” *Food Chemistry* 133(4):1230–40.
- Erihemu, K. Hironaka, Hiroshi Koaze, Yuji Oda, and Kenichiro Shimada. 2015. “Zinc Enrichment of Whole Potato Tuber by Vacuum Impregnation.” *J Food Sci Technol* 52(April):2352–58.
- Erihemu, Kazunori Hironaka, Hiroshi Koaze, Yuji Oda, Kenichiro Shimada, and H. Koase. 2015. “Iron Enrichment of Whole Potato Tuber by Vacuum Impregnation.” *Journal of Food Science and Technology* 52(4):2352–58.
- Espín, Erika. 2012. “Efecto Del Procesamiento Sobre La Biodisponibilidad de Cinco Micronutrientes Presentes En Diferentes Cultivares de Papa.” Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Espinal, Carlos, Héctor Martínez, Nidyan Pinzón, and Camilo Barrios. 2005. *La Cadena de La Papa En Colombia. Una Mirada Global de Su Estructura y Dinámica 1991-2005*. Bogotá.
- Ezekiel, Rajarathnam, and Narpinder Singh. 2011. “Use of Potato Flour in Bread and Flat Bread.” *Flour and Breads and Their Fortification in Health and Disease Prevention* 247–59.
- Ezekiel, Rajarathnam, Narpinder Singh, Shagun Sharma, and Amritpal Kaur. 2013. “Beneficial Phytochemicals in Potato - a Review.” *Food Research International* 50(2):487–96.
- Fandila, Carlos. 2010. “Propiedades Fisicoquímicas y de Digestibilidad de Almidón de Plátano (*Musa Paradisiaca* L.) Sometido a Una Modificación Dual.” Instituto Politécnico Nacional.
- FAO. 2008a. *El Año Internacional de La Papa 2008: Nueva Luz Sobre Un Tesoro Enterrado*. Roma: FAO.
- FAO. 2008b. “El Año Internacional de La Papa 2008 La Papa y La Inflación de Los Precios de Los Alimentos.”
- FAO. 2009. “Procesamiento y Fortificación de Los Alimentos.” *Capítulo 32*. Retrieved (<http://www.fao.org/3/w0073s/w0073s10.htm>).
- FAO. 2017. “FAOSTAT.” *Major Food and Agricultural Commodities and Producers*. Retrieved

- March 25, 2019 (<http://faostat.fao.org/>).
- FEDEPAPA. 2014. *La Papa y La Seguridad Alimentaria En La Región Andina: Situación Actual y Desafíos Para La Innovación*. Bogotá.
- FEDEPAPA. 2015. "Revista Papa." *REVISTA PAPA; Organo Informativo de La Federación Nacional de Productores de Papa*, 32–35.
- FEDEPAPA, and FNFP. 2018. *La Papa En Su Contexto*. Medellín.
- FEDEPAPA, and Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 2004. *Guía Ambiental Para El Cultivo De Papa*.
- Fernando Flores, Flavia Lozano. 2014. "Caracterización Físicoquímica, Reológica y Funcional de Harina de Avena (Avena Sativa L. Cv Bachíniva) Cultivada En La Región de Cuauhtémoc, Chihuahua." *Tecnociencia Chihuahua* VIII(3):152–62.
- Ferrua, Maria, and Paul Singh. 2015. "Human Gastric Simulator (Riddet Model)." Pp. 61–71 in *The Impact of Food Bioactives on Health*. New Zealand: Springer International Publishing.
- Figiel, Adam. 2009. "Drying Kinetics and Quality of Vacuum-Microwave Dehydrated Garlic Cloves and Slices." *Journal of Food Engineering* 94(1):98–104.
- Fito, P., A. Andrb, A. Chiralt, and P. Pardo. 1996. "Coupling of Hydrodynamic Mechanism and Phenomena During Vacuum Treatments in Solid Porous Food-Liquid Systems." *Journal of Food Engineering* 21:229–40.
- Fito, P, A. Chiralt, N. Betoret, M. Gras, M. Ch, J. Mart, A. Andr, and D. Vidal. 2001. "Vacuum Impregnation and Osmotic Dehydration in Matrix Engineering Application in Functional Fresh Food Development." 49.
- Fito, P., and R. Pastor. 1994. "Non-Diffusional Mechanisms Occurring during Vacuum Osmotic Dehydration." *Journal of Food Engineering* 1(21):513–19.
- Fito, Pedro. 1994. "Modelling of Vacuum Osmotic Dehydration of Food." *Journal of Food Engineering* 22(1–4):313–28.
- Fito, Pedro, Amparo Chiralt, José M. Barat, Ana Andrés, Javier Martínez-Monzó, and Nuria Martínez-Navarrete. 2001. "Vacuum Impregnation for Development of New Dehydrated Products." *Journal of Food Engineering* 49 49:297–302.
- Fito, Pedro, Amparo Chiralt, José M. Barat, Walter Spiess, and Diana Behsnilian. 2001. *Osmotic Dehydration & Vacuum Impregnation. Applications in Food Industries*. Vol. 1. CRC Press.
- Functional, Development, Analysis In, and Four Potato. 2013. "DESARROLLO DE CUATRO VARIEDADES DE PAPA." 172–85.
- Galán, María Gimena, Rolando José González, and Silvina Rosa Drago. 2014. "Perfil Nutricional y Dializabilidad de Minerales de Alimentos de Interés Social." *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética* 17(1):3.
- Garcia-Amezquita, L. E., J. Welti-Chanes, F. T. Vergara-Balderas, and D. Bermúdez-Aguirre. 2016. "Freeze-Drying: The Basic Process." *Encyclopedia of Food and Health* 104–9.
- García Ruíz, Daniela, Pablo Gutiérrez Sánchez, and Mauricio Marín Montoya. 2015. "ANÁLISIS FILOGENÉTICO Y VARIABILIDAD MOLECULAR DEL Potato Virus X (PVX) EN CULTIVOS DE PAPA DE ANTIOQUIA." *Acta Biológica Colombiana* 21(1):111–22.

- Gaukel, V., T. Siebert, and U. Erle. 2016. "Microwave-Assisted Drying." Pp. 152–78 in *The Microwave Processing of Foods: Second Edition*. North America.
- Geankoplis. 1998. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3ra ed. México: CECSA.
- Gerencia de Seguridad Alimentaria y Nutricional, Escuela de Nutrición y Dietética de la Universidad de Antioquia, and Gobernación de Antioquia. 2019. *Perfil Alimentario y Nutricional de Antioquia 2019. Resumen Ejecutivo*. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia, Escuela de Nutrición y Dietética.
- Gil, Angel. 2010. *Tratado de Nutrición. Composición y Calidad Nutritiva de Los Alimentos*. 2°. Madrid: Panamericana.
- Gionfriddo, Emanuela, Attilio Naccarato, Giovanni Sindona, and Antonio Tagarelli. 2012. "A Reliable Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Triple Quadrupole Mass Spectrometry Method for the Assay of Selenomethionine and Selenomethylselenocysteine in Aqueous Extracts: Difference between Selenized and Not-Enriched Selenium Potatoes." *Analytica Chimica Acta* 747:58–66.
- Gobernación de Antioquia. 2012. *Manual Técnico Del Cultivo de Papa Bajo Buenas Prácticas Agrícolas*.
- Gobernación de Antioquia, Maná, and Universidad de Antioquia. 2019. *Perfil Alimentario y Nutricional de Antioquia*. Medellín, Colombia.
- Gobierno Digital. 2019. "Alcaldía Municipal de La Unión En Antioquia." Retrieved September 9, 2019 (<http://www.launion-antioquia.gov.co/municipio/nuestra-tierra>).
- Goebel, Jorge Tiago, Lovedeep Kaur, Rosana Colussi, Elias Moacir, and Jaspreet Singh. 2019. "Microstructure of Indica and Japonica Rice Influences Their Starch Digestibility: A Study Using a Human Digestion Simulator." *Food Hydrocolloids* 94(February):191–98.
- Gómez-Galera, Sonia, Eduard Rojas, Duraialagaraja Sudhakar, Changfu Zhu, Ana M. Pelacho, Teresa Capell, and Paul Christou. 2010. "Critical Evaluation of Strategies for Mineral Fortification of Staple Food Crops." *Transgenic Research* 19(2):165–80.
- Gómez-Narváez, Fáver, José Contreras-Calderón, and Luis Pérez-Martínez. 2019. "Usefulness of Some Maillard Reaction Indicators for Monitoring the Heat Damage of Whey Powder under Conditions Applicable to Spray Drying." *International Dairy Journal* 104553.
- Goñi, Isabel, Alejandra García-Alonso, and Fulgencio Saura-Calixto. 1997. "A Starch Hydrolysis Procedure to Estimate Glycemic Index." *Nutrition Research* 17(3):427–37.
- Gorinstein, S., S. Yamagata, and D. Hadziyev. 1988. "Amino Acid Composition and Its Change in Raw and Granulated Potatoes during Processing." *Journal of Food Science* 53(1):308–10.
- Gowen, A., N. Abu-Ghannam, J. Frias, and J. Oliveira. 2006. "Optimisation of Dehydration and Rehydration Properties of Cooked Chickpeas (*Cicer Arietinum* L.) Undergoing Microwave-Hot Air Combination Drying." *Trends in Food Science and Technology* 17(4):177–83.
- Gras, M. L., D. Vidal, N. Betoret, A. Chiralt, and P. Fito. 2003. "Calcium Fortification of Vegetables by Vacuum Impregnation: Interactions with Cellular Matrix." *Journal of Food Engineering* 56(2–3):279–84.
- Gras, M., N. Vidal-Brotóns, A. Betoret, Chiralt, and P. Fito. 2002. "The Response of Some Vegetables to Vacuum Impregnation." *Innovative Food Science and Emerging Technologies*

3(3):263–69.

- Guerrero, María Belén. 2016. “Bioaccesibilidad de Antocianinas, Polifenoles Totales y Capacidad Antioxidante En Maqui, Secado Por Convección y Liofilización.” Universidad Austral de Chile.
- Guo, Qing, Aiqian Ye, Mita Lad, Douglas Dalgleish, and Harjinder Singh. 2014. “Effect of Gel Structure on the Gastric Digestion of Whey Protein Emulsion Gels.” *Soft Matter* 10(8):1214–23.
- Gutiérrez-Pulido, Humberto. 2012. *Análisis y Diseño de Experimentos*. 3rd ed. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Han, Qing-Hua, Li-Jun Yin, Shu-Jun Li, Bing-Nan Yang, and Ji-Wei Ma. 2010. “Optimization of Process Parameters for Microwave Vacuum Drying of Apple Lices Using Response Surface Method.” *Drying Technology* 28(4):523–32.
- Hassini, L., S. Azzouz, R. Peczalski, and A. Belghith. 2007. “Estimation of Potato Moisture Diffusivity from Convective Drying Kinetics with Correction for Shrinkage.” *Journal of Food Engineering* 79(1):47–56.
- Herbig, Anna Lena, and Catherine M. G. C. Renard. 2017. “Factors That Impact the Stability of Vitamin C at Intermediate Temperatures in a Food Matrix.” *Food Chemistry* 220:444–51.
- Hernández, Deisy. 2014. “EVALUACIÓN TECNOLÓGICA DE SNACKS DE PAPA (*Solanum Tuberosum* L.) OBTENIDOS MEDIANTE LA APLICACIÓN COMBINADA INGENIERÍA DE MATRICES Y FRITURA AL VACÍO.” Universidad Nacional de Colombia.
- Hernández, Deisy, Misael Cortés R, Francisco Castellanos, and Cynthia Tobón. 2014. “Influencia de Emulsiones de Impregnación Antipardeantes Sobre El Color de La Papa Durante El Almacenamiento.” *Revista de La Fac.Nal.Agr.Medellín* 67(2):143–46.
- Hironaka, K., M. Kikuchi, H. Koaze, T. Sato, M. Kojima, K. Yamamoto, K. Yasuda, M. Mori, and S. Tsuda. 2011. “Ascorbic Acid Enrichment of Whole Potato Tuber by Vacuum-Impregnation.” *Food Chemistry* 127(3):1114–18.
- Hirun, Sathira, Niramón Utama-ang, and Paul D. Roach. 2014. “Turmeric (*Curcuma Longa* L.) Drying: An Optimization Approach Using Microwave-Vacuum Drying.” *Journal of Food Science and Technology* 51(9):2127–33.
- Holtz, Emma, Lilia Ahrné, Michael Rittenauer, and Anders Rasmuson. 2010. “Influence of Dielectric and Sorption Properties on Drying Behaviour and Energy Efficiency during Microwave Convective Drying of Selected Food and Non-Food Inorganic Materials.” *Journal of Food Engineering* 97(2):144–53.
- Hossain, Ashrafi, and A. Jayadeep. 2018. “Determination of Tocopherol and Tocotrienol Contents in Maize by in Vitro Digestion and Chemical Methods.” *Journal of Cereal Science* 83(May):90–95.
- Hu, Qing-guo, and Min Zhang. 2006. “Drying of Edamames by Hot Air and Vacuum Microwave Combination.” *Journal of Food Engineering* 77:977–82.
- Huang, Lue, Min Zhang, Arun Mujumdar, and Rui Xin Lim. 2011. “Comparison of Four Drying Methods for Re-Structured Mixed Potato with Apple Chips.” *Journal of Food Engineering* 103(3):279–84.

- ICONTEC. 1996. *NORMA TÉCNICA COLOMBIANA*. Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. 2008. *Mapas de La Situación Nutricional En Colombia*. Vol. 9. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. 2010. *Encuesta Nacional de La Situación Nutricional En Colombia*. Bogotá.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. 1992. *Almacenamiento de Papas*. edited by U. de D. e I. T. del INIA. Uruguay: Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur.
- ISO. 2010. *ISO 26642. Food Products. Determination of Glycaemic Index (GI) and Recommendation for Food Classification*. Geneva, Switzerland: International Standards Organisation.
- Jadán, Carlos. 2017. “Estrategias Dietéticas Para Disminuir La Biodisponibilidad de Mercurio Desde Alimentos.” Universidad Politécnica de Valencia.
- Janve, Madhura, and Rekha S. Singhal. 2018. “Fortification of Puffed Rice Extrudates and Rice Noodles with Different Calcium Salts: Physicochemical Properties and Calcium Bioaccessibility.” *Lwt* 97(March):67–75.
- Jaswal, A. S. 1972. “Effects of Various Processing Methods on Free and Bound Amino Acid Content of Potatoes.” *American Potato Journal* 50:86–95.
- Jermann, Colette, Tatiana Koutchma, Edyta Margas, Craig Leadley, and Valquiria Ros-Polski. 2015. “Mapping Trends in Novel and Emerging Food Processing Technologies around the World.” *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 31:14–27.
- Jiang, Ning, Chunquan Liu, Dajing Li, and Yongjun Zhou. 2015. “Effect of Blanching on the Dielectric Properties and Microwave Vacuum Drying Behavior of Agaricus Bisporus Slices.” *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 30:89–97.
- Jiang, Yajun, Yafeng Zheng, Yuting Tian, Weijing Zhuang, Yingting Zhao, and Baodong Zheng. 2017. “Influence of Microwave Vacuum Drying on Glass Transition Temperature, Gelatinization Temperature, Physical and Chemical Qualities of Lotus Seeds.” *Food Chemistry* 228:167–76.
- Jiménez, Nora, Luis Carrillo-Hormaza, Andrea Pujol, Fernando Álzate, Edison Osorio, and Oscar Lara-Guzman. 2015. “Antioxidant Capacity and Phenolic Content of Commonly Used Anti-Inflammatory Medicinal Plants in Colombia.” *Industrial Crops and Products* 70:272–79.
- Joshi, A., S. G. Rudra, V. R. Sagar, P. Raigond, S. Dutt, B. Singh, and B. P. Singh. 2016. “Development of Low Fat Potato Chips through Microwave Processing.” *Journal of Food Science and Technology* 53(8):3296–3303.
- Joshi, Alka, A. Kar, S. G. Rudra, V. R. Sagar, E. Varghese, M. Lad, I. Khan, and B. Singh. 2016. “Vacuum Impregnation: A Promising Way for Mineral Fortification in Potato Porous Matrix (Potato Chips).” *Journal of Food Science and Technology* 53(12):4348–53.
- Jouquand, Celine, Frédéric J. Tessier, Julien Bernard, David Marier, Ken Woodward, Philippe Jacolot, Pascale Gadonna-Widehem, and Jean Claude Laguerre. 2015. “Optimization of Microwave Cooking of Beef Burgundy in Terms of Nutritional and Organoleptic Properties.” *LWT - Food Science and Technology* 60(1):271–76.

- Joykumar Singh, Ngankham, and Ram Krishna Pandey. 2012. "Convective Air Drying Characteristics of Sweet Potato Cube (*Ipomoea Batatas* L.)." *Food and Bioprocess Technology* 90(2):317–22.
- Kakade, R. H., H. Das, and Shaikat Ali. 2011. "Performance Evaluation of a Double Drum Dryer for Potato Flake Production." *Journal of Food Science and Technology* 48(4):432–39.
- Kärenlampi, Sirpa O., and Philip J. White. 2009. "Potato Proteins, Lipids, and Minerals." Pp. 99–125 in *Advances in Potato Chemistry and Technology*.
- Karim, Zida, Melvin Holmes, and Caroline Orfila. 2017. "Inhibitory Effect of Chlorogenic Acid on Digestion of Potato Starch." *Food Chemistry* 217:498–504.
- Kaur, Lovedeep, Jaspreet Singh, Owen J. McCarthy, and Harmit Singh. 2007. "Physico-Chemical, Rheological and Structural Properties of Fractionated Potato Starches." *Journal of Food Engineering* 82(3):383–94.
- Kawai, Kiyoshi, Setsuko Takato, Tomoko Sasaki, and Kazuhito Kajiwara. 2012. "Complex Formation, Thermal Properties, and in-Vitro Digestibility of Gelatinized Potato Starch-Fatty Acid Mixtures." *Food Hydrocolloids* 27(1):228–34.
- Ketnawa, Sunantha, Lovedeep Kaur, Yukiharu Ogawa, and Jaspreet Singh. 2019. *Sweet Potato Microstructure, Starch Digestion, and Glycemic Index*. Elsevier Inc.
- Khraisheh, M. A. M., W. A. M. McMinn, and T. R. A. Magee. 2004. "Quality and Structural Changes in Starchy Foods during Microwave and Convective Drying." *Food Research International* 37(5):497–503.
- Kim, Eun-Jung Jung, and Hyun-Seok Seok Kim. 2015. "Physicochemical Properties of Dehydrated Potato Parenchyma Cells with Ungelatinized and Gelatinized Starches." *Carbohydrate Polymers* 117:845–52.
- Kim, Eun Jung, and Hyun Seok Kim. 2015. "Influence of Pectinase Treatment on the Physicochemical Properties of Potato Flours." *Food Chemistry* 167:425–32.
- Kingcam, Rungthip, Sakamon Devahastin, and Naphaporn Chiewchan. 2008. "Effect of Starch Retrogradation on Texture of Potato Chips Produced by Low-Pressure Superheated Steam Drying." *Journal of Food Engineering* 89(1):72–79.
- Kingman, Susan M., and Hans N. Englyst. 1994. "The Influence of Food Preparation Methods on the In-Vitro Digestibility of Starch in Potatoes." *Food Chemistry* 49(2):181–86.
- Kita, Agnieszka, Anna Bakowska-Barczak, Karel Hamouz, Klaudia Kułakowska, and Grazyna Lisińska. 2013. "The Effect of Frying on Anthocyanin Stability and Antioxidant Activity of Crisps from Red- and Purple-Fleshed Potatoes (*Solanum Tuberosum* L.)." *Journal of Food Composition and Analysis* 32(2):169–75.
- Knoerzer, Kai. 2016. "Nonthermal and Innovative Food Processing Technologies." *Reference Module in Food Science* 1–4.
- Kong, Fanbin, and R. Paul Singh. 2010. "A Human Gastric Simulator (HGS) to Study Food Digestion in Human Stomach." *Journal of Food Science* 75(9).
- Kotíková, Zora, Miloslav Šulc, Jaromír Lachman, Vladimír Pivec, Matyáš Orsák, and Karel Hamouz. 2016. "Carotenoid Profile and Retention in Yellow-, Purple- and Red-Fleshed Potatoes after Thermal Processing." *Food Chemistry* 197:992–1001.

- Kowalska, Jolanta, Hanna Kowalska, Agata Marzec, Tomasz Brzezina, Kinga Samborska, and Andrzej Lenart. 2018. "Dried Strawberries as a High Nutritional Value Fruit Snack." *Food Sci Biotechnol* 27:799–807.
- Kowalski, Stefan J., and Andrzej Pawlowski. 2015. "Intensification of Apple Drying Due to Ultrasound Enhancement." *Journal of Food Engineering* 156:1–9.
- Kramer-Stickland, Kimberly, and Daniel C. Liebler. 1998. "Effect of UVB on Hydrolysis of  $\alpha$ -Tocopherol Acetate to  $\alpha$ -Tocopherol in Mouse Skin." *Journal of Investigative Dermatology* 111(2):302–7.
- Kraus, Stefan, Katalin Sölyom, Heike P. Schuchmann, and Volker Gaukel. 2013. "Drying Kinetics and Expansion of Non-Predried Extruded Starch-Based Pellets during Microwave Vacuum Processing." *Journal of Food Process Engineering* 36(6):763–73.
- Kurozawa, Louise Emy, Iunes Terng, Miriam Dupas Hubinger, and Kil Jin Park. 2014. "Ascorbic Acid Degradation of Papaya during Drying: Effect of Process Conditions and Glass Transition Phenomenon." *Journal of Food Engineering* 123:157–64.
- Kusumayanti, Heny, Noer Abyor Handayani, and Herry Santosa. 2015. "Swelling Power and Water Solubility of Cassava and Sweet Potatoes Flour." *Procedia Environmental Sciences* 23(Ictcred 2014):164–67.
- Kwiatek, Monika A., Andreas Steingoetter, Anupam Pal, Dieter Menne, James G. Brasseur, Geoffrey S. Hebbard, Peter Boesiger, Miriam Thumshirn, Michael Fried, and Werner Schwizer. 2006. "Quantification of Distal Antral Contractile Motility in Healthy Human Stomach with Magnetic Resonance Imaging." *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 24(5):1101–9.
- Landaeta, G., a Espinoza, J. Mendez, Escuela De Zootecnia, and Los Guaritos. 2008. "Fortificación de Mitades de Duraznos Con Calcio Por Medio de La Deshidratación Osmótica a Vacío." 21:39–46.
- Lauridsen, Charlotte, Mette S. Hedemann, and Soren K. Jensen. 2001. "Hydrolysis of Tocopheryl and Retinyl Esters by Porcine Carboxyl Ester Hydrolase Is Affected by Their Carboxylate Moiety and Bile Acids." *Journal of Nutritional Biochemistry* 12(4):219–24.
- Laurie, Sunette, Mieke Faber, Patrick Adebola, and Abenet Belete. 2015. "Biofortification of Sweet Potato for Food and Nutrition Security in South Africa." *Food Research International* 76(P4):962–70.
- Lebovka, Nikolai I., Nikolai V. Shynkaryk, and Eugene Vorobiev. 2007. "Pulsed Electric Field Enhanced Drying of Potato Tissue." *Journal of Food Engineering* 78(2):606–13.
- Leeratanarak, Namtip, Sakamon Devahastin, and Naphaporn Chiewchan. 2006. "Drying Kinetics and Quality of Potato Chips Undergoing Different Drying Techniques." *Journal of Food Engineering* 77(3):635–43.
- Lefort, J. F., T. D. Durance, and M. K. Upadhyaya. 2003. "Effects of Tuber Storage and Cultivar on the Quality of Vacuum Microwave-Dried Potato Chips." *Journal of Food Science* 68(2):690–96.
- Lentle, Roger G., and Patrick W. M. Janssen. 2010. "Manipulating Digestion with Foods Designed to Change the Physical Characteristics of Digesta." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 50(2):130–45.



- Li, Yuan hui, Yan nian Li, Hui ting Li, Ya ru Qi, Zhen feng Wu, and Ming Yang. 2017. "Comparative Study of Microwave-Vacuum and Vacuum Drying on the Physicochemical Properties and Antioxidant Capacity of Licorice Extract Powder." *Powder Technology* 320:540–45.
- Lima, Ariana Maria Santos, Liz Oliveira dos Santos, Jorge Mauricio David, and Sergio Luis Costa Ferreira. 2019. "Mineral Content in Mustard Leaves According to the Cooking Method." *Food Chemistry* 273(July 2017):172–77.
- Lin, Yeu Pyng, Jen Horng Tsen, and V. An Erl King. 2005. "Effects of Far-Infrared Radiation on the Freeze-Drying of Sweet Potato." *Journal of Food Engineering* 68(2):249–55.
- Link, Jade Varaschim, Giustino Tribuzi, and João Borges Laurindo. 2018. "Conductive Multi-Flash Drying of Mango Slices: Vacuum Pulse Conditions on Drying Rate and Product Properties." *Journal of Food Processing and Preservation* 42(2).
- Litwack, Gerald. 2007. *Vitamin E - Vitamins and Hormones, Advances in Research and Applications*. Vol. 76. San Diego, USA: Academic Press publications.
- Liu, Q., R. Yada, and J. Arul. 2002. "Characterization of Thermal Properties of Potato Dry Matter - Water and Starch - Water Systems." *Journal of Food Science* 67(2):560–66.
- Liu, Qiang, Elizabeth Donner, Richard Tarn, Jaspreet Singh, and Hyun-Jung Chung. 2009. *Advanced Analytical Techniques to Evaluate the Quality of Potato and Potato Starch*. First Edit. Elsevier Ltd.
- Liu, Qiang, Richard Tarn, Dermot Lynch, and Neil M. Skjoldt. 2007. "Physicochemical Properties of Dry Matter and Starch from Potatoes Grown in Canada." *Food Chemistry* 105(3):897–907.
- Londoño Londoño, J. 2012. "Antioxidantes: Importancia Biológica y Métodos Para Medir Su Actividad." Pp. 129–62 in. Medellín, Colombia: Corporación Universitaria Lasallista.
- López-Barón, Nataly, Domenico Sagnelli, Andreas Blennow, Mette Holve, Jun Gao, Lasse Saaby, Anette Müllertz, Birthe Jespersen, and Thava Vasanthan. 2018. "Hydrolysed Pea Proteins Mitigate in Vitro Wheat Starch Digestibility." *Food Hydrocolloids* 79:117–26.
- López-Cobo, Ana, Ana M. Gómez-Caravaca, Lorenzo Cerretani, Antonio Segura-Carretero, and Alberto Fernández-Gutiérrez. 2014. "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." *Journal of Food Composition and Analysis* 36(1–2):1–11.
- Lorieau, Lucie, Linda Le Roux, Frédéric Gaucheron, Amandine Ligneul, Etienne Hazart, Didier Dupont, and Juliane Floury. 2018. "Bioaccessibility of Four Calcium Sources in Different Whey-Based Dairy Matrices Assessed by in Vitro Digestion." *Food Chemistry* 245(June 2017):454–62.
- Lu, Zhan Hui, Elizabeth Donner, Rickey Y. Yada, and Qiang Liu. 2016. "Physicochemical Properties and in Vitro Starch Digestibility of Potato Starch/Protein Blends." *Carbohydrate Polymers* 154:214–22.
- Lucas-González, Raquel. 2018. "Digestión de Alimentos: Tendencias En Los Modelos de Digestión in Vitro." *Revista Doctorado UMH* 2(2):5.
- Luis, G. ..., C. .. Rubio, D. .. González-Weller, A. J. .. Gutiérrez, C. .. Revert, and A. .. Hardisson. 2011. "Comparative Study of the Mineral Composition of Several Varieties of Potatoes (*Solanum Tuberosum* L.) from Different Countries Cultivated in Canary Islands (Spain)."

*International Journal of Food Science and Technology* 46(4):774–80.

- Luo, Wei, Silvia Tappi, Francesca Patrignani, Santina Romani, Rosalba Lanciotti, and Pietro Rocculi. 2019. “Essential Rosemary Oil Enrichment of Minimally Processed Potatoes by Vacuum-Impregnation.” *Journal of Food Science and Technology*.
- Madiouli, J., J. Sghaier, D. Lecomte, and H. Sammouda. 2012. “Determination of Porosity Change from Shrinkage Curves during Drying of Food Material.” *Food and Bioproducts Processing* 90(1):43–51.
- Mandalari, Giuseppina, Carlo Bisignano, Angela Filocamo, Simona Chessa, Mariagiovanna Sarò, Germana Torre, Richard M. Faulks, and Paola Dugo. 2013. “Bioaccessibility of Pistachio Polyphenols, Xanthophylls, and Tocopherols during Simulated Human Digestion.” *Nutrition* 29(1):338–44.
- Marques, Luanda G., Ana M. Silveira, and José T. Freire. 2006. “Freeze-Drying Characteristics of Tropical Fruits.” *Drying Technology* 24(4):457–63.
- Martelo, Yisell, Misael Cortés, and Héctor Suárez. 2010. “Development of Minimally Processed Celery Fortified with Vitamin E by Matrix Engineering.” *Dyna* 165:28–39.
- Martínez-Navarrete, Nuria, Ana M. Andrés Grau, Amparo Chiralt Boix, and Pedro Fito. 1999. *Termodinámica y Cinética de Sistemas Alimento-Entorno*. Valencia, España: Servicio de Publicaciones. Universidad Politécnica de Valencia.
- Mason, Shaun A., Bodil Rasmussen, Luc J. C. van Loon, Jo Salmon, and Glenn D. Wadley. 2019. “Ascorbic Acid Supplementation Improves Postprandial Glycaemic Control and Blood Pressure in Individuals with Type 2 Diabetes: Findings of a Randomized Cross-over Trial.” *Diabetes, Obesity and Metabolism* 21(3):674–82.
- Mateus de Lima, Marla, Giustino Tribuzi, José Antonio Ribeiro de Souza, Ivan Gonçalves de Souza, Joao Borges Laurindo, and Bruno Mattar. 2016. “Vacuum Impregnation and Drying of Calcium-Fortified Pineapple Snacks.” *Food Science and Technology* 72:501–9.
- Mcminn, W. A. M., and T. R. A. Magee. 1997. “Kinetics of Ascorbic Acid Degradation and Non-Enzymic Browning in Potatoes.” *Food and Bioproducts Processing* 75(4):223–31.
- Milbourne, Dan, Barnaly Pande, and Glenn J. Bryan. 2007. “Potato.” *Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants, Volume 3 [Pulses, Sugar and Tuber Crops]* 3:205–36.
- Mimouni, A., S. Bouhallab, M. H. Famelart, D. Naegele, and P. Schuck. 2007. “The Formation of Calcium Lactate Crystals Is Responsible for Concentrated Acid Whey Thickening.” *Journal of Dairy Science* 90(1):57–65.
- Minekus, Mans, André Brodkorb, Lotti Egger, Marie Alminger, Paula Alvito, Ricardo Assunção, Simon Ballance, Torsten Bohn, Claire Bourlieu-Lacanal, Rachel Boutrou, Frédéric Carrière, Alfonso Clemente, Milena Corredig, Didier Dupont, Claire Dufour, Cathrina Edwards, Matt Golding, Sibel Karakaya, Bente Kirkhus, Steven Le Feunteun, Uri Lesmes, Adam Macierzanka, Alan R. Mackie, Carla Martins, Sébastien Marze, David Julian McClements, Olivia Ménard, Reto Portmann, Cláudia N. Santos, Isabelle Souchon, R. Paul Singh, Gerd E. Vegarud, Martin S. J. Wickham, Werner Weitschies, and Isidra Recio. 2019. “INFOGEST Static in Vitro Simulation of Gastrointestinal Food Digestion.” *Nature Protocols* 14(4):991–1014.
- Ministerio de la Protección Social. 2011. *Resolución Número 333 De 2011*. Vol. 2011. Colombia.

- Ministerio de Salud y Protección Social. 2015. *Estrategia Nacional Para La Prevención y Control de Las Deficiencias de Micronutrientes En Colombia 2014-2021*. Bogotá.
- Mogol, Burçe Ataç, Arda Serpen, Slađana Źilić, Vural Gökmen, Gül Akıllıođlu, and Nenad Delić. 2013. "Effects of Extrusion, Infrared and Microwave Processing on Maillard Reaction Products and Phenolic Compounds in Soybean." *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94(1):45–51.
- Monteiro, Ricardo L., Jade V. Link, Giustino Tribuzi, Bruno A. M. Carciofi, and João B. Laurindo. 2018. "Microwave Vacuum Drying and Multi-Flash Drying of Pumpkin Slices." *Journal of Food Engineering* 232:1–10.
- Montero, Eduardo Castro. 2007. "Estudio de La Impregnación a Vacío de Miel y Su Efecto En Atributos de Calidad de Hojuelas de Manzana." Universidad de Chile.
- Moon, Ji Hoon, Cheol-ho Pan, and Won Byong Yoon. 2015. "Drying Characteristics and Thermal Degradation Kinetics of Hardness, Anthocyanin Content and Colour in Purple- and Red-Fleshed Potato (*Solanum Tuberosum* L.) during Hot Air Drying." *International Journal of Food Science & Technology* 50(5):1255–67.
- Moreira, Rosana G., and Samar Almohaimed. 2018. "Technology for Processing of Potato Chips Impregnated with Red Rootbeet Phenolic Compounds." *Journal of Food Engineering* 228:57–68.
- Moreno Rodríguez, Ana Cristina. 2011. "Desarrollo Farmacéutico de Formulaciones de Poliagregados de Anfotericina B." Universidad Complutense de Madrid.
- Morris, Cecile, Susanne Fichtel, and Andrew Taylor. 2011. "Impact of Calcium on Salivary  $\alpha$ -Amylase Activity, Starch Paste Apparent Viscosity and Thickness Perception." *Chem. Percept.* (4):116–22.
- Moser, Sydney, Ingrid Aragon, Amber Furrer, Jan Willem Van Klinken, Melissa Kaczmarczyk, Byung Hoo Lee, Judy George, Bruce R. Hamaker, Richard Mattes, and Mario G. Ferruzzi. 2018. "Potato Phenolics Impact Starch Digestion and Glucose Transport in Model Systems but Translation to Phenolic Rich Potato Chips Results in Only Modest Modification of Glycemic Response in Humans." *Nutrition Research* 52:57–70.
- Mújica-Paz, H., A. Valdez-Fragoso, A. López-Malo, E. Palou, and J. Welti-Chanes. 2003. "Impregnation Properties of Some Fruits at Vacuum Pressure." *Journal of Food Engineering* 56(4):307–14.
- Murayama, Daiki, Masayuki Tani, Shinya Ikeda, Jiwan P. Palta, Samantha W. Pelpolage, Hiroaki Yamauchi, and Hiroshi Koaze. 2017. "Effects of Calcium Concentration in Potato Tuber Cells on the Formation of Cross-Links between Pectin Molecules by  $Ca^{2+}$ ." *American Journal of Potato Research* 94(5):524–33.
- Murniece, Iriša, Daina Karklina, Ruta Galoburda, Dace Santare, Ilze Skrabule, and Helena S. Costa. 2011. "Nutritional Composition of Freshly Harvested and Stored Latvian Potato (*Solanum Tuberosum* L.) Varieties Depending on Traditional Cooking Methods." *Journal of Food Composition and Analysis* 24(4–5):699–710.
- Nayak, Balunkeswar, Jose Berrios, Juming Tang, Jose Berrios, and Juming Tang. 2014. "Impact of Food Processing on the Glycemic Index (GI) of Potato Products." *Food Research International* 56:35–46.
- Nemš, Agnieszka, Anna Pęksa, Alicja Z. Kucharska, Anna Sokół-Łęćowska, Agnieszka Kita,

- Wioletta Drozd, and Karel Hamouz. 2015. "Anthocyanin and Antioxidant Activity of Snacks with Coloured Potato." *Food Chemistry* 172:175–82.
- Nieto, a., D. Salvatori, M. a. Castro, and S. M. Alzamora. 1998. "Air Drying Behaviour of Apples as Affected by Blanching and Glucose Impregnation." *Journal of Food Engineering* 36(1):63–79.
- Noda, Takahiro, Takigawa Shigenobu, Matsuura-Endo Chie, Ishiguro Koji, Nagasawa Koichi, and Jinno Masahiro. 2015. "Properties of Calcium-Fortified Potato Starch Prepared by Immersion in Natural Mineral Water and Its Food Application." *Journal of Applied Glycoscience* 62(4):159–64.
- Noda, Takahiro, Shigenobu Takigawa, Chie Matsuura-Endo, Koji Ishiguro, Koichi Nagasawa, and Masahiro Jinno. 2014. "Preparation of Calcium- and Magnesium-Fortified Potato Starches with Altered Pasting Properties." *Molecules* 19(9):14556–66.
- Oancea, Ana Maria, Mihaela Turturică, Gabriela Bahrim, Gabriela Râpeanu, and Nicoleta Stănciuc. 2017. "Phytochemicals and Antioxidant Activity Degradation Kinetics during Thermal Treatments of Sour Cherry Extract." *LWT - Food Science and Technology* 82:139–46.
- Occhino, Elisabetta, Isabel Hernando, Empar Llorca, Lilia Neri, and Paola Pittia. 2011. "Effect of Vacuum Impregnation Treatments to Improve Quality and Texture of Zucchini (Cucurbita Pepo, L)." *Procedia Food Science* 1(Vi):829–35.
- Oikonomopoulou, Vasiliki P., Magdalini K. Krokida, and Vaios T. Karathanos. 2011. "The Influence of Freeze Drying Conditions on Microstructural Changes of Food Products." *Procedia Food Science* 1(Icef 11):647–54.
- Oladele, O. O., and A. T. Abonsade. 2009. "Influence of Different Drying Methods and Storage on the Quality of Indian Spinach (Basella Rubra L.)." *American Journal of Food Technology* 4(2):66–70.
- OMS, and FAO. 2017. *Guías Para La Fortificación de Alimentos Con Micronutrientes*. Switzerland: OMS.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2008. "El Año Internacional de La Papa 2008: Las Papas, La Nutrición y La Alimentación." 2.
- Ormerod, A., J. Ralfs, S. Jobling, M. Gidley, R. Unilever, and D. Colworth. 2002. "The Influence of Starch Swelling on the Material Properties of Cooked Potatoes." 7:1667–73.
- Osorio-Arias, J., S. Delgado-Arias, L. Cano, S. Zapata, M. Quintero, H. Nuñez, C. Ramírez, R. Simpson, and O. Vega-Castro. 2019. "Sustainable Management and Valorization of Spent Coffee Grounds Through the Optimization of Thin Layer Hot Air-Drying Process." *Waste and Biomass Valorization* (0123456789).
- Ostos, Sandra Liliana, Amanda Díaz, and Héctor Suárez. 2012. "Evaluation Process in Different Conditions of Mango Fortification (Tommy Atkins) with Calcium by Vacuum Impregnation." *Rev Chil Nutr* 39(3):181–90.
- Park, Su I., Yanyun Zhao, Scott W. Leonard, and M. G. Traber. 2005. "Vitamin E and Mineral Fortification in Fresh-Cut Apples (Fuji) Using Vacuum Impregnation." *Nutrition and Food Science* 35(6):393–402.
- Patel, D. N., P. P. Sutar, and N. Sutar. 2013. "Development of Instant Fermented Cereal-Legume Mix Using Pulsed Microwave Vacuum Drying." *Drying Technology* 31(3):314–28.

- Patel, J. H., and P. P. Sutar. 2016. "Acceleration of Mass Transfer Rates in Osmotic Dehydration of Elephant Foot Yam (*Amorphophallus Paeoniifolius*) Applying Pulsed-Microwave-Vacuum." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 36:201–11.
- Paz, Carolina. 2019. "Influencia de Factores Inherentes Al Alimento y Al Individuo Sobre La Digestibilidad de Lípidos de Origen Vegetal." Universidad Politécnica de Valencia.
- Pedreschi, Franco, Pablo Cortés, and María S. Mariotti. 2018. "Potato Crisps and Snack Foods." *Reference Module in Food Science* 1–10.
- Pedreschi, From Franco, and Lovdeep Kaur. 2009. "Fried and Dehydrated Potato Products." P. 319 in *Advances in Potato Chemistry and Technology*. Elsevier.
- Peksa, A., A. Kita, K. Kulakowska, M. Aniolowska, K. Hamouz, and A. Nems. 2013. "The Quality of Protein of Coloured Fleshed Potatoes." *Food Chemistry* 141(3):2960–66.
- Pereira, Gabriela Garrastazu, Cassia Britto Detoni, Tiago Lima Da Silva, Letícia Marques Colomé, Adriana Raffin Pohlmann, and Silvia Stanisçuaski Guterres. 2015. "α-Tocopherol Acetate-Loaded Chitosan Microparticles: Stability during Spray Drying Process, Photostability and Swelling Evaluation." *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 30:220–24.
- Pérez, Jara. 2012. "Metodología Para La Evaluación de Ingredientes Funcionales Antioxidantes." Universidad Autónoma de Madrid.
- Pérez, Sonia. 2015. "Mejora de La Bioaccesibilidad y Estabilidad Del Resveratrol Mediante La Utilización de Nanopartículas y Complejos Poliméricos." Universidad Pública de Navarra.
- Perla, Venu, David G. Holm, and Sastry S. Jayanty. 2012. "Effects of Cooking Methods on Polyphenols, Pigments and Antioxidant Activity in Potato Tubers." *LWT - Food Science and Technology* 45(2):161–71.
- Pharmacopeia. 2000. *Simulated Gastric Fluid. Simulated Intestinal Fluid*. Rockville, MD, USA, Rockville, MD, USA.
- Przetaczek-Roznowska, Izabela. 2017. "Physicochemical Properties of Starches Isolated from Pumpkin Compared with Potato and Corn Starches." *International Journal of Biological Macromolecules* 101:536–42.
- Quinchoa, Jairo Yovani Rios, Sonia Del Carmen Jaramillo Villegas, Luis Hernán González Santamaría, and José Miguel Cotes Torres. 2010. "Determinación Del Efecto de Diferentes Niveles de Fertilización En Papa (*Solanum Tuberosum* Ssp. Andigena) Diacol Capiro En Un Suelo Con Propiedades." *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 63(1):5225–37.
- Quirós Saucedo, Ana Elena, Hugo Palafox, Rosario Maribel Robles Sánchez, and Gustavo A. González Aguilar. 2011. "Interacción De Compuestos Fenólicos Y Fibra Dietaria: Capacidad Antioxidante Y Biodisponibilidad." *BIOTecnia* 13(3):3.
- Radziejewska-kubzdela, El, and Marcin Kido. 2014. "Applicability of Vacuum Impregnation to Modify Physico-Chemical, Sensory and Nutritive Characteristics of Plant Origin Products — A Review." *International Journal of Molecular Sciences* 15:16577–610.
- Ramírez, Cristian, Camila Millón, Helena Nuñez, Valeria Campo, Sergio Almonacid, and Ricardo Simpson. 2019. "Effect of Particle Size Distribution on the in Vitro Digestion of Calcium Alginate-starchy Model Foods." *Journal of Food Process Engineering* (April):e13097.
- Ramírez Navas, Juan Sebastián. 2006. *Liofilización de Alimentos*. Cali: Universidad del Valle.

- Rao, M. A. 2014. *Engineering Properties of Foods*. 4th ed. edited by CRC.
- René, M., M. Dávila, M. Cortés, and Jesús Gil. 2016. “Cambios Físicos y Químicos Durante El Almacenamiento En Plátano Impregnado Al Vacío Con Soluciones Antioxidantes.” *Biocología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial* 14(2):125–34.
- Restrepo, Ana María, Alejandra Arredondo, Cristian Morales, Marisol Tamayo, Yara Benavides, Vanessa Bedoya, and Catalina Vélez. 2012. “Aplicación de La Técnica de Impregnación a Vacío En El Desarrollo de Cáscaras de Naranja Mínimamente Procesadas Fortificadas Con Potasio, Sodio, y Vitaminas B1, B6 y B9.” *Journal of Engineering and Technology* 1(67):8–16.
- Restrepo, Ana María, Misael Cortes, and Benjamín Rojano. 2009. “Shelf Life of Strawberry ( *Fragaria Ananassa* Duch.) Fortified with Vitamin E.” *Dyna* 159:163–75.
- Restrepo, Ana María, Misael Cortés, and Benjamín Rojano. 2009. “Shelf Life of Strawberry ( *Fragaria Ananassa* Duch.) Fortified with Vitamin E.” *Dyna* 159:163–75.
- Restrepo, Ana María, Misael Cortés Rodríguez, and Carlos Julio Márquez. 2009. “Uchuvas (*Physalis Peruviana* L.) Mínimamente Procesadas Fortificadas Con Vitamina E.” *VITAE, Revista de La Facultad de Química Farmacéutica* 16(1):19–30.
- Robles Oñate, Macarena del Pilar. 2012. “Relación Entre Algunas Propiedades Fisicoquímicas y Térmicas de Gelatinización y Retrogradación En Almidón de Papa Nativa de Chiloé.” Universidad Austral de Chile.
- Rocha Barrasa, René Antonio. 2013. “Fluoruro En Alimentos: Contenidos, Bioaccesibilidad y Absorción Por El Epitelio Intestinal.” Universidad Politécnica de Valencia.
- Rodríguez-Roque, María Janeth. 2014. “In Vitro Bioaccessibility of Health-Related Compounds from Beverages Based on Fruit Juice, Milk or Soymilk: Influence of Food Matrix and Processing.” (c):1–256.
- Rodríguez-Roque, María Janeth, Begoña de Ancos, Concepción Sánchez-Moreno, M. Pilar Cano, Pedro Elez-Martínez, and Olga Martín-Belloso. 2015. “Impact of Food Matrix and Processing on the in Vitro Bioaccessibility of Vitamin C, Phenolic Compounds, and Hydrophilic Antioxidant Activity from Fruit Juice-Based Beverages.” *Journal of Functional Foods* 14:33–43.
- Rodríguez, Luis, and Liz Moreno. 2010. “Factores y Mecanismos Relacionados Con La Dormancia En Tubérculos de Papa . Una Revisión Factors and Mechanisms Related to Tuber Dormancy in Potato : An Overview.” *Agronomía Colombiana* 28(2):189–97.
- Rodríguez, Misael, Luis F. Guardiola, and Roger Pacheco. 2008. “Aplicación De La Ingeniería De Matrices En La Fortificación De Mango (Var. Tommy Atkins) Con Calcio.” *Dyna* 74(153):19–26.
- Rojas, John, Julián Quintero, Yhors Ciro, Alfredo Moreno, Javier Silva-Agreto, and Ricardo Torres-Palma. 2019. “Comparative Assessment of Shrimp Hydrolyzates as Alternative Organic Fertilizers for Legumes.” P. 13 in *Food Waste as a Resource*. Vol. I. IntechOpen.
- Rosales-Soto, Maria U., Peter M. Gray, John K. Fellman, D. Scott Mattinson, Gülhan Ünlü, Kerry Huber, and Joseph R. Powers. 2016. “Microbiological and Physico-Chemical Analysis of Fermented Protein-Fortified Cassava (*Manihot Esculenta* Crantz) Flour.” *LWT - Food Science and Technology* 66:355–60.

- Rovalino-Córdova, Ana M., Vincenzo Fogliano, and Edoardo Capuano. 2018. "A Closer Look to Cell Structural Barriers Affecting Starch Digestibility in Beans." *Carbohydrate Polymers* 181(September 2017):994–1002.
- Ruhanian, Shiva, and Kamyar Movagharnejad. 2015. "Mathematical Modeling and Experimental Analysis of Potato Thin-Layer Drying in an Infrared-Convective Dryer." *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 9(1):84–91.
- Ruíz, Marliza. 2009. "Aplicación de La Ingeniería de Matrices En El Desarrollo de Hongos Comestibles Mínimamente Procesados, Fortificados Con Vitaminas C, E y Minerales Calcio y Zinc." Universidad Nacional de Colombia.
- Salvador, A., P. Varela, T. Sanz, and S. M. Fiszman. 2009. "Understanding Potato Chips Crispy Texture by Simultaneous Fracture and Acoustic Measurements, and Sensory Analysis." *LWT - Food Science and Technology* 42(3):763–67.
- Salvatori, Daniela, Ana Andrés, Amparo Chiralt, and Pedro Fito. 1998. "The Response of Some Properties of Fruits to Vacuum Impregnation." *Journal of Food Process Engineering* 21(1):59–73.
- Samoticha, Justyna, Aneta Wojdyło, and Krzysztof Lech. 2016. "The Influence of Different the Drying Methods on Chemical Composition and Antioxidant Activity in Chokeberries." *LWT - Food Science and Technology* 66:484–89.
- Santacruz-Vázquez, V., J. Santacruz-Vázquez, M. Jaramillo-Flores, R. Farrera-Rebollo, J. Chanona-Pérez, J. Welte-Chanes, and G. Gutiérrez-López. 2008. "Usos de Procesos de Secado e Impregnación Para El Desarrollo de Alimentos Funcionales: Enriquecimiento de Placas de Manzana Con Betacaroteno." *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas* 39(3).
- dos Santos, Thais Paes R., Magali Leonel, Émerson L. Garcia, Ezequiel L. do Carmo, and Célia Maria L. Franco. 2016. "Crystallinity, Thermal and Pasting Properties of Starches from Different Potato Cultivars Grown in Brazil." *International Journal of Biological Macromolecules* 82:144–49.
- Sanzana, Sigrid. 2010. "Viabilidad Del Desarrollo de Alimentos Funcionales Frescos Por Incorporación de Aloe Vera a La Matriz Estructural de Endibia, Brócoli, Coliflor y Zanahoria Mediante La Técnica de Impregnación a Vacío." Universidad Politécnica de Valencia.
- Sayago, A., M. I. Marín, R. Aparicio, and M. T. Morales. 2007. "Vitamina E y Aceites Vegetales." *Grasas y Aceites* 58(1):74–86.
- Scaman, Christine H., Timothy D. Durance, Liana Drummond, and Da-wen Sun. 2014. "Combined Microwave Vacuum Drying." Pp. 427–45 in *Emerging Technologies for Food Processing*, edited by Da-Wen Sun. Dublin, Ireland: Academic Press.
- Schubert, Helmar, and Marc Regier. 2005. *The Microwave Processing of Foods*. edited by C. Press. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
- Schubert, Helmar, Marc Regier, Kai Knoerzer, and Helmar Schubert. 2005. *The Microwave Processing of Foods*. Second Edi. edited by C. Press. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
- Schulze, Beate, Eva Maria Hubbermann, and Karin Schwarz. 2014. "Stability of Quercetin Derivatives in Vacuum Impregnated Apple Slices after Drying (Microwave Vacuum Drying, Air Drying, Freeze Drying) and Storage." *LWT - Food Science and Technology* 57(1):426–33.

- Schwizer, Werner, Andreas Steingoetter, and Mark Fox. 2006. "Magnetic Resonance Imaging for the Assessment of Gastrointestinal Function." *Scandinavian Journal of Gastroenterology* 41(11):1245–60.
- Setiady, Dewi, Carter Clary, Frank Younce, and Barbara a. Rasco. 2007. "Optimizing Drying Conditions for Microwave-Vacuum (MIVAC®) Drying of Russet Potatoes ( *Solanum Tuberosum* )." *Drying Technology* 25(9):1483–89.
- Setiady, Dewi, Barbara Rasco, Frank Younce, and Carter Clary. 2009. "Rehydration and Sensory Properties of Dehydrated Russet Potatoes (*Solanum Tuberosum*) Using Microwave Vacuum, Heated Air, or Freeze Dehydration." *Drying Technology* 27(10):1116–22.
- Setiady, Dewi, Juming Tang, Frank Younce, Barry A. Swanson, Barbara A. Rasco, and Carter A. Clary. 2009. "Porosity, Color, Texture and Microscopic Structure of Russet Potatoes Dried Using Microwave Vacuum, Heated Air, and Freeze Drying." *Applied Engineering in Agriculture* 25(5):719–24.
- Shakouri, Shahrzad, Hamid Reza Ziaolhagh, Javad Sharifi-Rad, Mojtaba Heydari-Majd, Rohallah Tajali, Somayeh Nezarat, and Jaime A. Teixeira da Silva. 2014. "The Effect of Packaging Material and Storage Period on Microwave-Dried Potato (*Solanum Tuberosum* L.) Cubes." *Journal of Food Science and Technology* 52(6):3899–3910.
- Sham, P. W. Y., C. H. Scaman, and T. D. Durance. 2001. "Texture of Vacuum Microwave Dehydrated Apple Chips as Affected by Calcium Pretreatment, Vacuum Level, and Apple Variety." *Journal of Food Science* 66(9):1341–47.
- Sharma, Shri., Steven; Mulvaney, and Syed. Rizvi. 2003. *Ingeniería de Alimentos. Operaciones Unitarias y Prácticas de Laboratorio*. First. Limusa Wiley.
- Shofian, Norshahida Mohamad, Azizah Abdul Hamid, Azizah Osman, Nazamid Saari, Farooq Anwar, Mohd Sabri Pak Dek, and Muhammad Redzuan Hairuddin. 2011. "Effect of Freeze-Drying on the Antioxidant Compounds and Antioxidant Activity of Selected Tropical Fruits." *International Journal of Molecular Sciences* 12(7):4678–92.
- Simkova, Dagmar, Jaromir Lachman, Karel Hamouz, and Bohumil Vokal. 2013. "Effect of Cultivar, Location and Year on Total Starch, Amylose, Phosphorus Content and Starch Grain Size of High Starch Potato Cultivars for Food and Industrial Processing." *Food Chemistry* 141(4):3872–80.
- Singh, Fateh, V. K. Katiyar, and B. P. Singh. 2015. "Mathematical Modeling to Study Influence of Porosity on Apple and Potato during Dehydration." *Journal of Food Science and Technology* 52(9):5442–55.
- Singh, Jaspreet, Anne Dartois, and Lovedeep Kaur. 2010. "Starch Digestibility in Food Matrix: A Review." *Trends in Food Science and Technology* 21(4):168–80.
- Singh, Jaspreet, and Lovedeep Kaur. 2016. *Advances in Potato Chemistry and Technology*. 2nd ed. Palmerston North, New Zealand: Elsevier.
- Singh, Jaspreet, Lovedeep Kaur, and O. J. McCarthy. 2007. "Factors Influencing the Physico-Chemical, Morphological, Thermal and Rheological Properties of Some Chemically Modified Starches for Food Applications-A Review." *Food Hydrocolloids* 21(1):1–22.
- Singh, Jaspreet, Lovedeep Kaur, and Harjinder Singh. 2013. *Food Microstructure and Starch Digestion*. Vol. 70. 1st ed. Elsevier Inc.



- Singh, Jaspreet, Owen J. McCarthy, and Harjinder Singh. 2006. "Physico-Chemical and Morphological Characteristics of New Zealand Taewa (Maori Potato) Starches." *Carbohydrate Polymers* 64(4):569–81.
- Singh, Jaspreet, Owen J. McCarthy, Harjinder Singh, Paul J. Moughan, and Lovedeep Kaur. 2007. "Morphological, Thermal and Rheological Characterization of Starch Isolated from New Zealand Kamo Kamo (Cucurbita Pepo) Fruit - A Novel Source." *Carbohydrate Polymers* 67(2):233–44.
- Singh, Jaspreet, Narpinder Singh, T. R. Sharma, and S. K. Saxena. 2003. "Physicochemical, Rheological and Cookie Making Properties of Corn and Potato Flours." *Food Chemistry* 83(3):387–93.
- Singh, Paul, and Dennis R. Heldman. 2012. *Introduction To Food Engineering*. Fourth. London: Elsevier.
- Srivastava, Avinash, Vinay Bhardwaj, and B. P. Singh. 2016. *Gene Pool Diversity and Crop Improvement. Potato Diversity and Its Genetic Enhancement*. Vol. 10.
- Stasiak, Mateusz, Robert Rusinek, Marek Molenda, Józef Fornal, and Wioletta Błaszczak. 2011. "Effect of Potato Starch Modification on Mechanical Parameters and Granules Morphology." *Journal of Food Engineering* 102(2):154–62.
- STATGRAPHICS. 2006. *Diseño de Experimentos. Optimización de Múltiples Respuestas*. United States of America.
- StatPoint Technologies Inc. 2010. *STATGRAPHICS Centurion XVI. Manual de Usuario*. United States of America: Statpoint Technologies, Inc.
- Stinco, Carla M., Gloria Pumilia, Daniele Giuffrida, Giacomo Dugo, Antonio J. Meléndez-Martínez, and Isabel M. Vicario. 2019. "Bioaccessibility of Carotenoids, Vitamin A and  $\alpha$ -Tocopherol, from Commercial Milk-Fruit Juice Beverages: Contribution to the Recommended Daily Intake." *Journal of Food Composition and Analysis* 78(January):24–32.
- Su, Ya, Min Zhang, Weiming Zhang, Benu Adhikari, and Zaixing Yang. 2016. "Application of Novel Microwave-Assisted Vacuum Frying to Reduce the Oil Uptake and Improve the Quality of Potato Chips." *LWT - Food Science and Technology* 73:490–97.
- Suárez, Alba. 2012. *Modelo de Volatilidad y Estacionalidad de Productos Agroalimentarios Para América Latina "Una Aplicación En La Central de Abastos de Bogotá"*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Sun, Da-Wen. 2012. *Advances in Food Extrusion Technology*. Vol. 13.
- Superintendencia de Industria y Comercio. 2009. "Cadena Productiva De La Papa: Diagnóstico De Libre Competencia." 1–6.
- Tadesse, Berhe, Minaleshewa Atlabachew, and Kebede Nigussie Mekonnen. 2015. "Concentration Levels of Selected Essential and Toxic Metals in Potato (*Solanum Tuberosum* L.) of West Gojjam, Amhara Region, Ethiopia." *SpringerPlus* 4(1):514.
- Tahvonen, R., R. M. Hietanen, J. Sihvonen, and E. Salminen. 2006. "Influence of Different Processing Methods on the Glycemic Index of Potato (Nicola)." *Journal of Food Composition and Analysis* 19(4):372–78.
- Tamargo, Alba, Irene Gil-Sánchez, Beatriz Miralles, Diana Martín, Tiziana García-Risco, Mónica

- Fornari, Begoña Bartolomé, Victoria Moreno-Arribas, and Carolina Cueva. 2017. "The Dynamic Gastrointestinal Simulator (Simgi®): A Useful Tool for Clinical Nutrition." *Nutrición Hospitalaria* 34(6):1489–96.
- Tamasi, Gabriella, Matteo Cambi, Nicola Gaggelli, Antonella Autino, Mauro Cresti, and Renzo Cini. 2015. "The Content of Selected Minerals and Vitamin C for Potatoes (*Solanum Tuberosum* L.) from the High Tiber Valley Area, Southeast Tuscany." *Journal of Food Composition and Analysis* 41:157–64.
- Tamura, Masatsugu, Yumi Okazaki, Chisato Kumagai, and Yukiharu Ogawa. 2017. "The Importance of an Oral Digestion Step in Evaluating Simulated in Vitro Digestibility of Starch from Cooked Rice Grain." *Food Research International* 94:6–12.
- Tamura, Masatsugu, Jaspreet Singh, Lovedeep Kaur, and Yukiharu Ogawa. 2016a. "Impact of Structural Characteristics on Starch Digestibility of Cooked Rice." *Food Chemistry* 191:91–97.
- Tamura, Masatsugu, Jaspreet Singh, Lovedeep Kaur, and Yukiharu Ogawa. 2016b. "Impact of the Degree of Cooking on Starch Digestibility of Rice - An in Vitro Study." *Food Chemistry* 191:98–104.
- Teixidó, Anna. 2015. "Uso de Nanoemulsiones Enriquecidas En Betacaroteno y Vitamina E Como Recubrimientos Comestibles: Estudio de La Bioaccesibilidad de Las Sustancias Activas." Universidad de Lleida.
- Tharanathan, Rudrapatnam N. 2005. "Starch - Value Addition by Modification." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 45(5):371–84.
- Tian, Jinhu, Shiguo Chen, Join Shi, Jianchu Chen, Donghong Liu, Yidi Cai, Yukiharu Ogawa, and Xingqian Ye. 2017. "Microstructure and Digestibility of Potato Strips Produced by Conventional Frying and Air-Frying: An in Vitro Study." *Food Structure* 14(May):30–35.
- Tian, Jinhu, Shiguo Chen, Chunhua Wu, Jingqiu Chen, Xinyi Du, Jianchu Chen, Donghong Liu, and Xingqian Ye. 2016. "Effects of Preparation Methods on Potato Microstructure and Digestibility: An in Vitro Study." *Food Chemistry* 211:564–69.
- Tian, Jinhu, Shiguo Chen, Huiling Zhang, Haitian Fang, Yujing Sun, Donghong Liu, Robert J. Linhart, and Xingqian Ye. 2018. "Existing Cell Wall Fragments Modify the Thermal Properties and Hydrolysis of Potato Starch." *Food Hydrocolloids* 85(May):229–32.
- Tian, Jinhu, Yukiharu Ogawa, John Shi, Shiguo Chen, Huiling Zhang, Donghong Liu, and Xingqian Ye. 2018. "The Microstructure of Starchy Food Modulates Its Digestibility." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 8398:1–12.
- Tiwari, Pratibha, Alka Joshi, Eldho Varghese, and Monika Thakur. 2018. "Process Standardization and Storability of Calcium Fortified Potato Chips through Vacuum Impregnation." *Journal of Food Science and Technology* 55(8):3221–31.
- TNO Health Living. 2013. "TIM Gastrointestinal Systems." Retrieved July 16, 2020 ([https://www.tno.nl/media/4057/tim\\_gastrointestinal\\_systems.pdf](https://www.tno.nl/media/4057/tim_gastrointestinal_systems.pdf)).
- Tomassi, G. 1986. "An Assessment of the Safety of Tocopherols as Food Aditives." *Food and Chemical Toxicology* 24(10):1051–61.
- Torres, J. D., M. L. Castello, I. Escriche, and A. Chiralt. 2008. "Quality Characteristics, Respiration Rates, and Microbial Stability of Osmotically Treated Mango Tissue (*Mangifera Indica* L.)

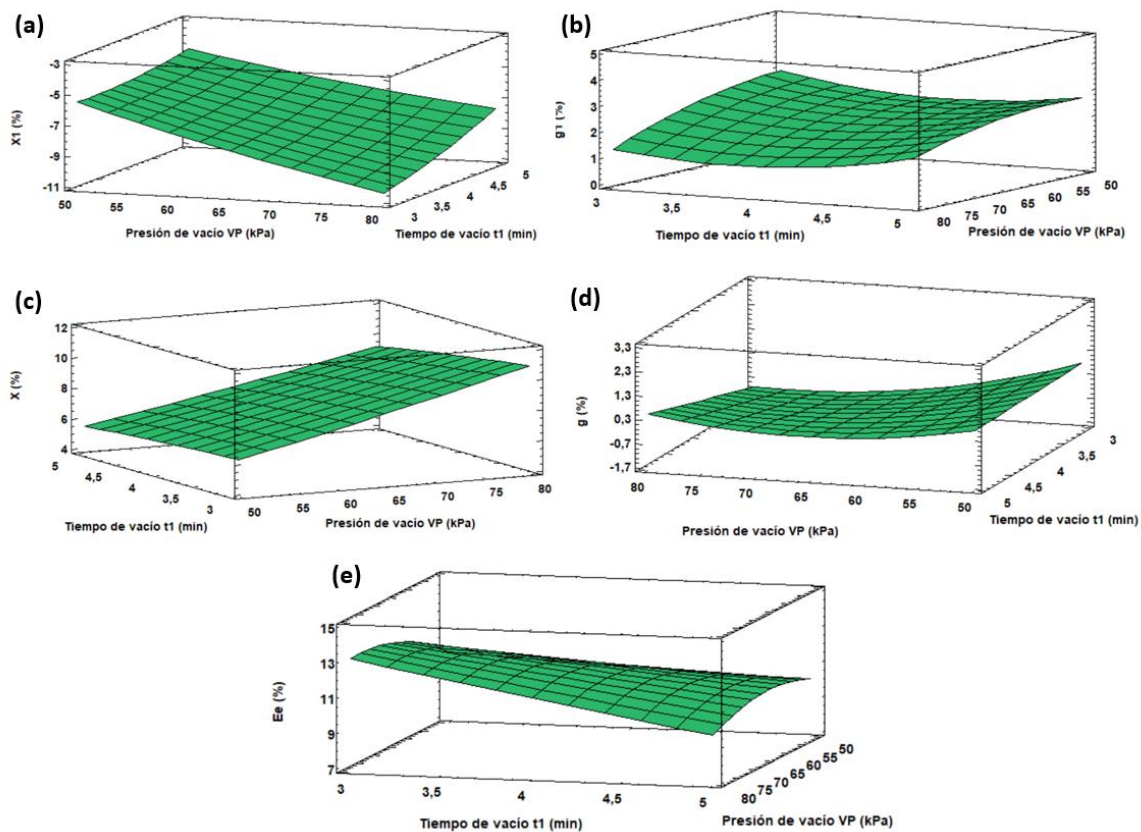
- with or without Calcium Lactate.” *Food Science and Technology International* 14:355–65.
- Tripathy, P. P. 2015. “Investigation into Solar Drying of Potato: Effect of Sample Geometry on Drying Kinetics and CO<sub>2</sub> Emissions Mitigation.” *Journal of Food Science and Technology* 52(3):1383–93.
- Trujillo-Agudelo, Sara, Ana Osorio, Faver Gómez, Jose Contreras-Calderón, Marta Mesías-García, Cristina Delgado-Andrade, Francisco Morales, and Oscar Vega-Castro. 2019. “Evaluation of the Application of an Edible Coating and Different Frying Temperatures on Acrylamide and Fat Content in Potato Chips.” *Journal of Food Process Engineering* (July):1–11.
- Vásquez, Fresia. 2011. “Lechuga de Cuarta Gama Enriquecida Con Calcio. Evaluación de Algunos Parámetros de Calidad.” Universidad Politécnica de Valencia.
- Verhoeckx, Kitty, Paul Cotter, Charlotte Kleiveland, Tor Lea, Alan Mackie, and Teresa Requena. 2015. *The Impact of Food Bioactives on Health*.
- Vicente Illera, Gonzalo. 2012. “Fraccionamiento y Aplicaciones de Extractos Supercríticos de Romero (*Rosmarinus Officinalis*).” Universidad Autónoma de Madrid.
- Villanueva, Marina, Joanna Harasym, José María Muñoz, and Felicidad Ronda. 2019. “Rice Flour Physically Modified by Microwave Radiation Improves Viscoelastic Behavior of Doughs and Its Bread-Making Performance.” *Food Hydrocolloids* 90(September 2018):472–81.
- Voda, Adrian, Natalia Homan, Magdalena Witek, Arno Duijster, Gerard van Dalen, Ruud van der Sman, Jaap Nijse, Lucas van Vliet, Henk Van As, and John van Duynhoven. 2012. “The Impact of Freeze-Drying on Microstructure and Rehydration Properties of Carrot.” *Food Research International* 49(2):687–93.
- Wageningen University & Research on Social Media. 2020. “Simulator of Human Intestinal Microbial Ecosystem (SHIME®).” Retrieved July 16, 2020 (<https://www.wur.nl/en/product/Simulator-of-Human-Intestinal-Microbial-Ecosystem-SHIME.htm>).
- Wang, Rui, Min Zhang, and Arun S. Mujumdar. 2010. “Effects of Vacuum and Microwave Freeze Drying on Microstructure and Quality of Potato Slices.” *Journal of Food Engineering* 101(2):131–39.
- Woolife, Jennifer A. 1987. *The Potato in the Human Diet*. Cambridge: Cambridge University Press.
- World Health Organization. 2018. “Healthy Diet.” Retrieved (<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet>).
- Xiao, Chaowen, and Charles T. Anderson. 2013. “Roles of Pectin in Biomass Yield and Processing for Biofuels.” *Frontiers in Plant Science* 4(MAR):1–8.
- Yadav, A. Ramesh, Manisha Guha, R. N. Tharanathan, and R. S. Ramteke. 2006. “Influence of Drying Conditions on Functional Properties of Potato Flour.” *European Food Research and Technology* 223(4):553–60.
- Yaman, Mustafa, Hafsa Sena Sargin, and Ömer Faruk Mızrak. 2019. “Free Sugar Content, in Vitro Starch Digestibility and Predicted Glycemic Index of Ready-to-Eat Breakfast Cereals Commonly Consumed in Turkey: An Evaluation of Nutritional Quality.” *International Journal of Biological Macromolecules* 135:1082–87.
- Yamdeu Galani, Joseph Hubert, Pooja M. Mankad, Avadh K. Shah, Nilesh J. Patel, Rajeshkumar R.

- Acharya, and Jayant G. Talati. 2017. "Effect of Storage Temperature on Vitamin C, Total Phenolics, UPLC Phenolic Acid Profile and Antioxidant Capacity of Eleven Potato ( *Solanum Tuberosum* ) Varieties." *Horticultural Plant Journal* 3(2):73–89.
- Yang, Jing, Jin Feng Chen, Yu Ying Zhao, and Lin Chun Mao. 2010. "Effects of Drying Processes on the Antioxidant Properties in Sweet Potatoes." *Agricultural Sciences in China* 9(10):1522–29.
- Yang, Yali, Isabel Achaerandio, and Montserrat Pujolà. 2016. "Effect of the Intensity of Cooking Methods on the Nutritional and Physical Properties of Potato Tubers." *Food Chemistry* 197:1301–10.
- Yang, Ying, Eric Andrew Decker, Hang Xiao, and David Julian McClements. 2015. *Enhancing Vitamin E Bioaccessibility: Factors Impacting Solubilization and Hydrolysis of  $\alpha$ -Tocopherol Acetate Encapsulated in Emulsion-Based Delivery Systems*. Vol. 6.
- Yang, Ying, and David Julian McClements. 2013. "Vitamin E Bioaccessibility: Influence of Carrier Oil Type on Digestion and Release of Emulsified  $\alpha$ -Tocopherol Acetate." *Food Chemistry* 141(1):473–81.
- Yassaroh, Yassaroh, Albert J. J. Woortman, and Katja Loos. 2019. "A New Way to Improve Physicochemical Properties of Potato Starch." *Carbohydrate Polymers* 204(October 2018):1–8.
- Zaidul, I. S. M., Nik Norulaini, A. K. Mohd. Omar, Hiroaki Yamauchi, and Takahiro Noda. 2007. "Correlations of the Composition, Minerals, and RVA Pasting Properties of Various Potato Starches." *Starch/Staerke* 59(6):269–76.
- Zapata, Sandra, Ana María Piedrahita, and Benjamín Rojano. 2014. "Capacidad Atrapadora de Radicales Oxígeno (ORAC) y Fenoles Totales de Frutas y Hortalizas de Colombia." *Perspectivas En Nutrición Humana* 16(1):25–36.
- Zhang, Jun, Min Zhang, Liang Shan, and Zhongxiang Fang. 2007. "Microwave-Vacuum Heating Parameters for Processing Savory Crisp Bighead Carp (*Hypophthalmichthys Nobilis*) Slices." *Journal of Food Engineering* 79(3):885–91.
- Zhang, Le, Zhaogai Wang, Guanying Shi, Hui Yang, Xiaomin Wang, Hongyuan Zhao, and Shouhuan Zhao. 2018. "Effects of Drying Methods on the Nutritional Aspects, Flavor, and Processing Properties of Chinese Chestnuts." *Journal of Food Science and Technology* 55(9):3391–98.
- Zhang, M., J. Tang, A. S. Mujumdar, and S. Wang. 2006. "Trends in Microwave-Related Drying of Fruits and Vegetables." *Trends in Food Science and Technology* 17(10):524–34.
- Zhou, Fengchao, Qian Liu, Hongwei Zhang, Qian Chen, and Baohua Kong. 2016. "Potato Starch Oxidation Induced by Sodium Hypochlorite and Its Effect on Functional Properties and Digestibility." *International Journal of Biological Macromolecules* 84:410–17.
- Zielinska, M., P. Zapotoczny, O. Alves-Filho, T. M. Eikevik, and W. Blaszcak. 2013. "Microwave Vacuum-Assisted Drying of Green Peas Using Heat Pump and Fluidized Bed: A Comparative Study Between Atmospheric Freeze Drying and Hot Air Convective Drying." *Drying Technology* 31(6):633–42.
- Zielinska, Magdalena, Ewa Ropelewska, and Marek Markowski. 2017. "Thermophysical Properties of Raw, Hot-Air and Microwave-Vacuum Dried Cranberry Fruits (*Vaccinium Macrocarpon*)." *LWT - Food Science and Technology* 85:204–11.

- Žilić, Sladana M., Irina N. Božović, Stojan Savić, and Sladana Šobajić. 2006. "Heat Processing of Soybean Kernel and Its Effect on Lysine Availability and Protein Solubility." *Central European Journal of Biology* 1(4):572–83.
- Zvitov-Ya'ari, R., and A. Nussinovitch. 2014. "Browning Prevention in Rehydrated Freeze-Dried Non-Blanched Potato Slices by Electrical Treatment." *LWT - Food Science and Technology* 56(1):194–99.

## ANEXO 1

*Gráficos de Metodología Superficie de Respuesta para el diseño de experimentos de impregnación al vacío para  $t_2=4$  min*



## ANEXO 2

*Tabla de correlaciones de Pearson para el diseño de experimentos de impregnación al vacío*

## Correlaciones

	Presión de vacío P (in Hg)	Tiempo de vacío t1 (min)
Presión de vacío P (in Hg)		0,0000
		(18)
		1,0000
Tiempo de vacío t1 (min)	0,0000	
	(18)	
	1,0000	
Tiempo de restauración t2 (min)	0,0000	0,0000
	(18)	(18)
	1,0000	1,0000
X1 (%)	-0,7552	0,3618
	(18)	(18)
	0,0003	0,1402
g1 (%)	-0,4222	0,0276
	(18)	(18)
	0,0809	0,9135
X (%)	0,8480	-0,2475
	(18)	(18)
	0,0000	0,3220
g (%)	-0,3070	0,1954
	(18)	(18)
	0,2152	0,4370
Ea (%)	0,1937	-0,4009
	(18)	(18)
	0,4413	0,0992

*Correlación*

*(Tamaño de la muestra)*

*Valor-P*

	Tiempo de restauración t2 (min)	X1 (%)	g1 (%)	X (%)
Presión de vacío P (in Hg)	0,0000	-0,7552	-0,4222	0,8480
	(18)	(18)	(18)	(18)
	1,0000	0,0003	0,0809	0,0000
Tiempo de vacío t1 (min)	0,0000	0,3618	0,0276	-0,2475
	(18)	(18)	(18)	(18)
	1,0000	0,1402	0,9135	0,3220
Tiempo de restauración t2 (min)		0,0989	0,1859	-0,0197
		(18)	(18)	(18)
		0,6962	0,4602	0,9381
X1 (%)	0,0989		0,1873	-0,9610
	(18)		(18)	(18)
	0,6962		0,4567	0,0000
g1 (%)	0,1859	0,1873		-0,1594
	(18)	(18)		(18)
	0,4602	0,4567		0,5276
X (%)	-0,0197	-0,9610	-0,1594	
	(18)	(18)	(18)	
	0,9381	0,0000	0,5276	
g (%)	0,2929	0,4247	0,7012	-0,3156
	(18)	(18)	(18)	(18)
	0,2383	0,0790	0,0012	0,2020
Ee (%)	-0,2367	-0,6647	-0,1930	0,5444
	(18)	(18)	(18)	(18)
	0,3443	0,0026	0,4428	0,0195

*Correlación*

*(Tamaño de la muestra)*

*Valor-P*



	$\bar{g}$ (%)	$E_{\bar{g}}$ (%)
Presión de vacío P (in Hg)	-0,3070	0,1937
	(18)	(18)
	0,2152	0,4413
Tiempo de vacío t1 (min)	0,1954	-0,4009
	(18)	(18)
	0,4370	0,0992
Tiempo de restauración t2 (min)	0,2929	-0,2367
	(18)	(18)
	0,2383	0,3443
X1 (%)	0,4247	-0,6647
	(18)	(18)
	0,0790	0,0026
$\bar{g}_1$ (%)	0,7012	-0,1930
	(18)	(18)
	0,0012	0,4428
X (%)	-0,3156	0,5444
	(18)	(18)
	0,2020	0,0195
$\bar{E}$ (%)		-0,7595
		(18)
		0,0003
$E_{\bar{E}}$ (%)	-0,7595	
	(18)	
	0,0003	

*Correlación*

*(Tamaño de la muestra)*

*Valor-P*

## ANEXO 3

*Soluciones encontradas para la función Deseabilidad en cada punto del diseño de experimentos de Impregnación al vacío*

					<i>Deseabilidad</i>	<i>Deseabilidad</i>
<i>Fila</i>	<i>XI (%)</i>	<i>X (%)</i>	<i>g (%)</i>	<i>Ee (%)</i>	<i>Prevista</i>	<i>Observada</i>
1	-9,67	10,02	1,48	12,76	0,211212	0,789064
2	-5,48	5,75	1,68	8,69	0,00806318	0,00640142
3	-4,52	5,4	2,79	7,19	0,0	0,0
4	-8,05	8,66	-0,9	13,65	0,353831	0,431716
5	-4,98	5,41	1,38	8,9	0,00373377	0,00151979
6	-8,72	8,24	-1,68	13,78	0,211212	0,0
7	-7,1	6,8	-0,09	9,73	0,123646	0,0722104
8	-9,99	10,14	0,63	10,61	0,62449	0,591042
9	-9,76	9,62	-1,02	11,77	0,616505	0,615996
10	-5,82	6,81	1,4	7,92	0,0666607	0,0134393
11	-8,01	9,0	0,28	9,74	0,150667	0,229445
12	-8,1	9,2	-0,19	10,39	0,549418	0,294167
13	-5,09	6,05	0,65	7,79	0,0830575	0,00278447
14	-6,34	7,0	-1,4	11,58	0,211212	0,0834487
15	-7,12	8,47	1,66	7,71	0,0	0,0405771
16	-4,96	5,14	-0,44	10,57	0,0	0,0
17	-7,69	8,14	-0,74	12,03	0,211212	0,263908
18	-5,17	5,82	0,93	9,74	0,0190995	0,00751502

*Entre los puntos del diseño la deseabilidad máxima se alcanzó en la ejecución 8.*

## ANEXO 4

**Tablas ANOVA, Pruebas de Múltiples Rangos y Gráficos de Medias para los compuestos fortificantes en papa fresca (FP), papa impregnada (IP) papa fortificada y deshidratada por aire caliente (IP + HAD), papa fortificada y deshidratada por liofilización (IP + FD) y papa fortificada y deshidratada por microondas al vacío (IP + MVD).**

**Tabla ANOVA para Calcio por P**

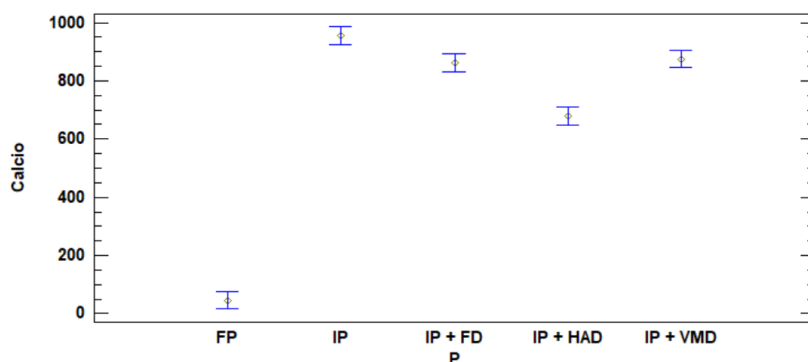
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,65127E6	4	412818,	364,42	0,0000
Intra grupos	11328,0	10	1132,8		
Total (Corr.)	1,6626E6	14			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Calcio por P**

Método: 95,0 porcentaje LSD

P	Casos	Media	Grupos Homogéneos
FP	3	45,913	X
IP + HAD	3	679,146	X
IP + FD	3	862,723	X
IP + VMD	3	875,944	X
IP	3	956,875	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



Medias y 95,0% de Fisher LSD

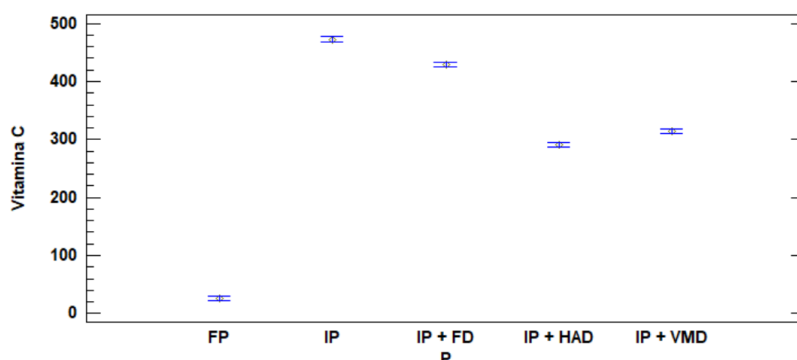


Tabla ANOVA para Vitamina C por P

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	364326,	4	91081,6	4328,19	0,0000
Intra grupos	210,438	10	21,0438		
Total (Corr.)	364537,	14			

## Pruebas de Múltiple Rangos para Vitamina C por P

Método: 95,0 porcentaje LSD

P	Casos	Media	Grupos Homogéneos
FP	3	26,4348	X
IP + HAD	3	290,276	X
IP + VMD	3	314,751	X
IP + FD	3	429,062	X
IP	3	472,792	X

Tabla ANOVA para Vitamina E por P

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2780,04	4	695,009	3704,65	0,0000
Intra grupos	1,87604	10	0,187604		
Total (Corr.)	2781,91	14			

## Pruebas de Múltiple Rangos para Vitamina E por P

Método: 95,0 porcentaje LSD

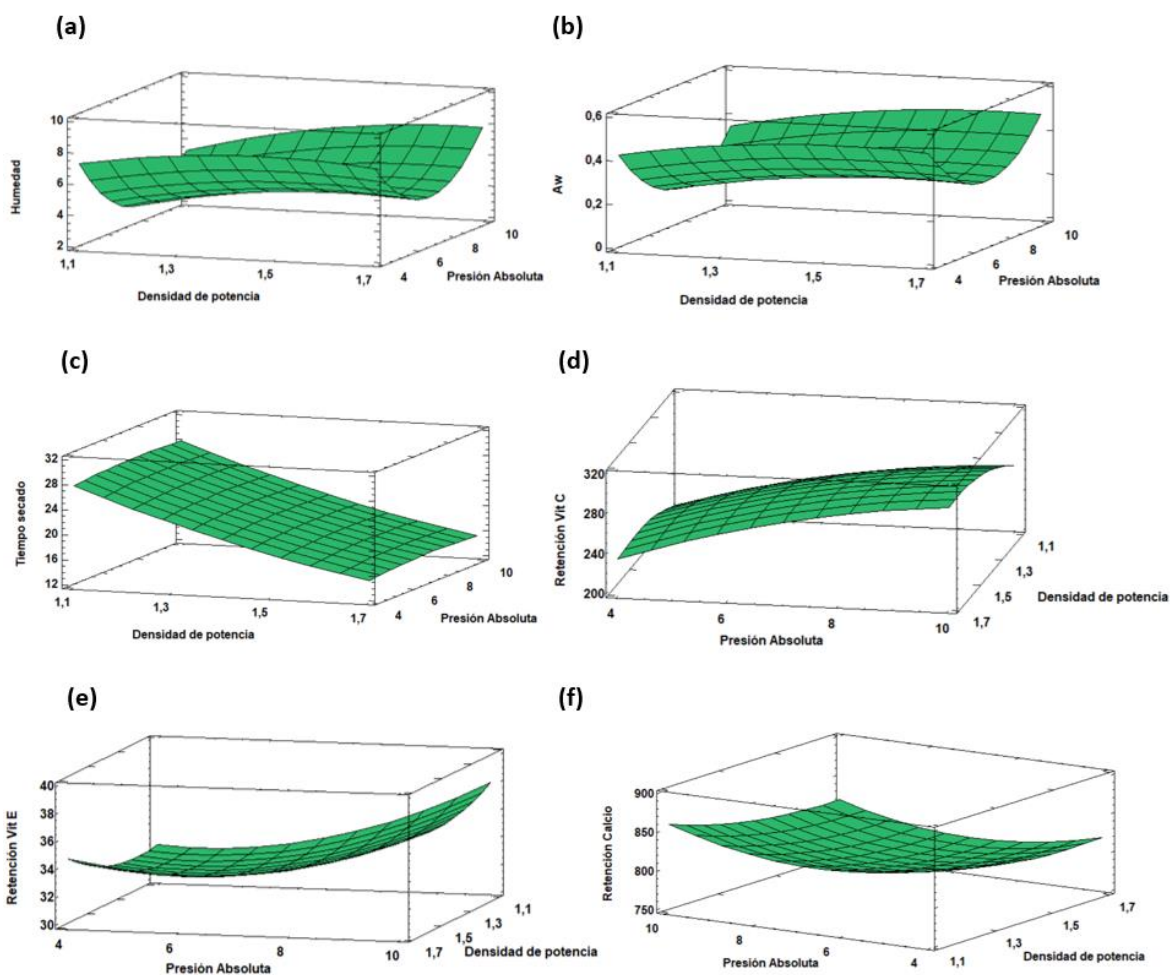
P	Casos	Media	Grupos Homogéneos
FP	3	0	X
IP + HAD	3	11,6733	X
IP + VMD	3	13,2759	X
IP + FD	3	32,9054	X
IP	3	35,9167	X

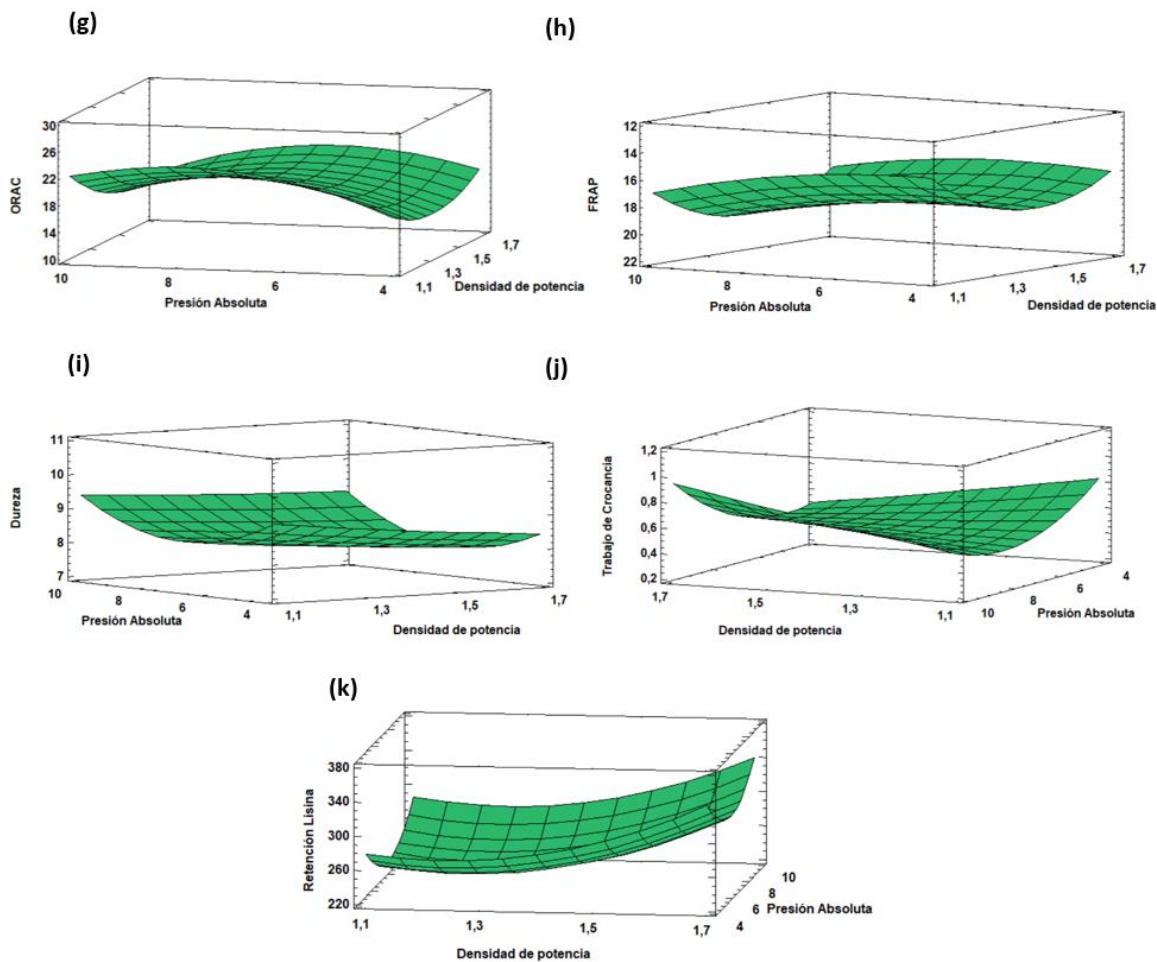
Medias y 95,0% de Fisher LSD



## ANEXO 5

*Gráficos de Metodología Superficie de Respuesta para el diseño de experimentos del proceso de secado por microondas al vacío*





## ANEXO 6

*Tabla de correlaciones de Pearson para el diseño de experimentos del proceso de secado por microondas al vacío*

## Correlaciones

	Densidad de potencia	Presión Absoluta	Humedad	Aw	Tiempo secado
Densidad de potencia		0,0000	0,2578	0,2505	-0,9924
		(14)	(14)	(14)	(14)
		1,0000	0,3736	0,3877	0,0000
Presión Absoluta	0,0000		-0,1590	-0,1192	0,0261
	(14)		(14)	(14)	(14)
	1,0000		0,5871	0,6847	0,9294
Humedad	0,2578	-0,1590		0,9101	-0,2938
	(14)	(14)		(14)	(14)
	0,3736	0,5871		0,0000	0,3079
Aw	0,2505	-0,1192	0,9101		-0,2796
	(14)	(14)	(14)		(14)
	0,3877	0,6847	0,0000		0,3330
Tiempo secado	-0,9924	0,0261	-0,2938	-0,2796	
	(14)	(14)	(14)	(14)	
	0,0000	0,9294	0,3079	0,3330	
Retención Vit E	0,1031	0,6250	0,1520	0,2663	-0,0685
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,7258	0,0169	0,6040	0,3574	0,8160
Retención Vit C	0,2954	0,6350	-0,1235	-0,1472	-0,3053
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,3052	0,0147	0,6741	0,6156	0,2884
ORAC	-0,2472	0,1227	-0,5004	-0,5190	0,3198
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,3943	0,6760	0,0684	0,0572	0,2650
FRAP	0,1652	0,3304	0,0944	0,1377	-0,2395
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,5724	0,2485	0,7483	0,6387	0,4095
Trabajo de Crocancia	0,0840	0,1423	0,6112	0,6602	-0,0751
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,7754	0,6276	0,0202	0,0102	0,7985
Retención Lisina	0,4445	0,0284	0,4787	0,3711	-0,4255
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,1113	0,9231	0,0833	0,1915	0,1293
Dureza	-0,2730	0,2197	0,4241	0,3217	0,2831
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,3450	0,4505	0,1307	0,2621	0,3267
Retención Calcio	-0,3904	0,0991	0,2372	0,2218	0,4230
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,1676	0,7362	0,4143	0,4460	0,1318

	Retención Vit E	Retención Vit C	ORAC	FRAP	Trabajo de Crocancia
Densidad de potencia	0,1031	0,2954	-0,2472	0,1652	0,0840
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,7258	0,3052	0,3943	0,5724	0,7754
Presión Absoluta	0,6250	0,6350	0,1227	0,3304	0,1423
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,0169	0,0147	0,6760	0,2485	0,6276
Humedad	0,1520	-0,1235	-0,5004	0,0944	0,6112
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,6040	0,6741	0,0684	0,7483	0,0202
Aw	0,2663	-0,1472	-0,5190	0,1377	0,6602
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,3574	0,6156	0,0572	0,6387	0,0102
Tiempo secado	-0,0685	-0,3053	0,3198	-0,2395	-0,0751
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,8160	0,2884	0,2650	0,4095	0,7985
Retención Vit E		0,2242	-0,0514	0,0815	0,2657
		(14)	(14)	(14)	(14)
		0,4409	0,8613	0,7819	0,3586
Retención Vit C	0,2242		0,1235	0,7467	-0,0199
	(14)		(14)	(14)	(14)
	0,4409		0,6740	0,0022	0,9462
ORAC	-0,0514	0,1235		-0,1026	-0,4271
	(14)	(14)		(14)	(14)
	0,8613	0,6740		0,7272	0,1277
FRAP	0,0815	0,7467	-0,1026		-0,0583
	(14)	(14)	(14)		(14)
	0,7819	0,0022	0,7272		0,8430
Trabajo de Crocancia	0,2657	-0,0199	-0,4271	-0,0583	
	(14)	(14)	(14)	(14)	
	0,3586	0,9462	0,1277	0,8430	
Retención Lisina	0,5273	-0,1477	-0,3617	-0,2693	0,2227
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,0526	0,6142	0,2039	0,3518	0,4440
Dureza	0,4876	-0,1107	-0,0902	-0,0990	0,5281
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,0769	0,7063	0,7590	0,7364	0,0522
Retención Calcio	0,3755	-0,1977	0,2645	-0,1292	0,3866
	(14)	(14)	(14)	(14)	(14)
	0,1859	0,4980	0,3608	0,6599	0,1721

*Correlación*

*(Tamaño de la muestra)*

*Valor-P*



	Retención Lisina	Dureza	Retención Calcio
Densidad de potencia	0,4445	-0,2730	-0,3904
	(14)	(14)	(14)
	0,1113	0,3450	0,1676
Presión Absoluta	0,0284	0,2197	0,0991
	(14)	(14)	(14)
	0,9231	0,4505	0,7362
Humedad	0,4787	0,4241	0,2372
	(14)	(14)	(14)
	0,0833	0,1307	0,4143
Aw	0,3711	0,3217	0,2218
	(14)	(14)	(14)
	0,1915	0,2621	0,4460
Tiempo secado	-0,4255	0,2831	0,4230
	(14)	(14)	(14)
	0,1293	0,3267	0,1318
Retención Vit E	0,5273	0,4876	0,3755
	(14)	(14)	(14)
	0,0526	0,0769	0,1859
Retención Vit C	-0,1477	-0,1107	-0,1977
	(14)	(14)	(14)
	0,6142	0,7063	0,4980
ORAC	-0,3617	-0,0902	0,2645
	(14)	(14)	(14)
	0,2039	0,7590	0,3608
FRAP	-0,2693	-0,0990	-0,1292
	(14)	(14)	(14)
	0,3518	0,7364	0,6599
Trabajo de Crocancia	0,2227	0,5281	0,3866
	(14)	(14)	(14)
	0,4440	0,0522	0,1721
Retención Lisina		0,4476	0,2302
		(14)	(14)
		0,1085	0,4285
Dureza	0,4476		0,8347
	(14)		(14)
	0,1085		0,0002
Retención Calcio	0,2302	0,8347	
	(14)	(14)	
	0,4285	0,0002	

*Correlación*

*(Tamaño de la muestra)*

*Valor-P*

## ANEXO 7

*Soluciones encontradas para la función Deseabilidad en cada punto del diseño de experimentos del proceso de secado por microondas al vacío*

				<i>Deseabilidad</i>	<i>Deseabilidad</i>
<i>Fila</i>	<i>Tiempo secado</i>	<i>Retención Vit E</i>	<i>Trabajo de Crocancia</i>	<i>Prevista</i>	<i>Observada</i>
1	21,0	33,81	0,415	0,674863	0,759033
2	21,0	33,47	0,674	0,674863	0,668665
3	28,0	32,29	0,89	0,306533	0,0
4	20,0	32,68	0,561	0,632738	0,666576
5	16,0	34,06	0,511	0,822876	0,82501
6	21,0	37,64	0,749	0,760412	0,76908
7	21,0	34,25	0,474	0,674863	0,76751
8	15,0	36,79	0,926	0,0	0,0
9	21,0	31,28	0,413	0,674863	0,0
10	28,0	37,08	0,531	0,0	0,0
11	15,0	35,02	0,55	0,870819	0,870058
12	28,0	34,6	0,445	0,0	0,0
13	21,0	31,7	0,551	0,674863	0,526987
14	21,0	31,36	0,621	0,674863	0,380523

*Entre los puntos del diseño la deseabilidad máxima se alcanzó en la ejecución 11.*

## ANEXO 8

*Análisis de Varianza, Prueba de Múltiples Rangos y Gráfico de Medias para la Estabilidad de los compuestos adicionados durante el almacenamiento*

## Análisis de Varianza para Calcio - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:SEMANA	23479,5	4	5869,87	5,70	0,0023
B:ATMÓSFERA	11004,0	1	11004,0	10,69	0,0032
RESIDUOS	24695,4	24	1028,97		
TOTAL (CORREGIDO)	59178,9	29			

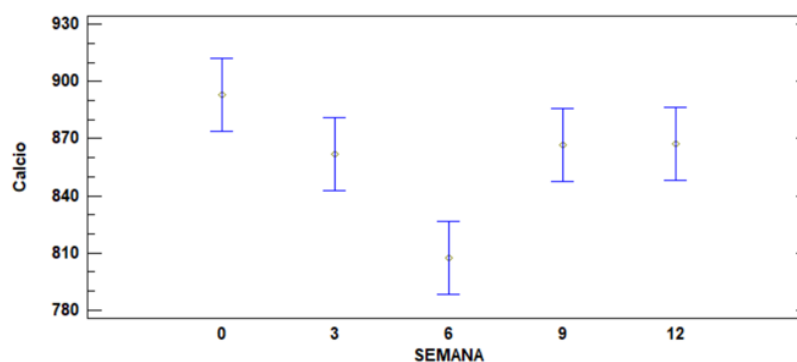
Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

## Pruebas de Múltiple Rangos para Calcio por SEMANA

Método: 95,0 porcentaje LSD

SEMANA	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
6	6	807,658	13,0956	X
3	6	861,74	13,0956	X
9	6	866,499	13,0956	X
12	6	867,021	13,0956	X
0	6	892,902	13,0956	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD

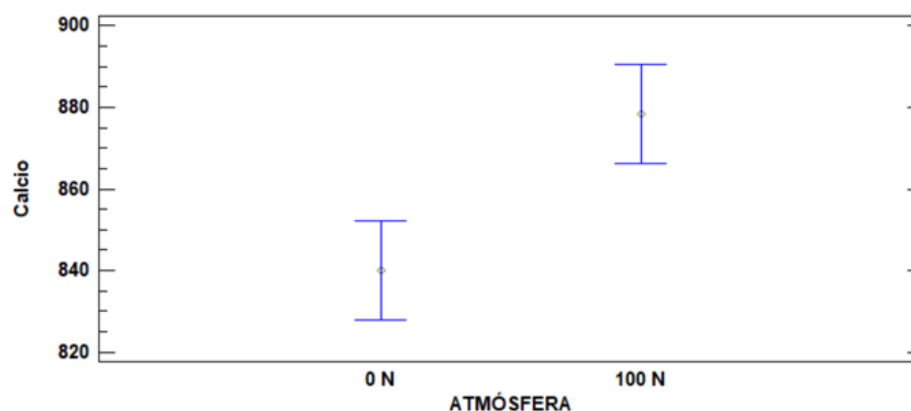


### Pruebas de Múltiple Rangos para Calcio por ATMÓSFERA

Método: 95,0 porcentaje LSD

ATMÓSFERA	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
0 N	15	840,012	8,28241	X
100 N	15	878,316	8,28241	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



### Análisis de Varianza para Vitamina C - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:SEMANA	16237,0	4	4059,25	12,90	0,0000
B:ATMÓSFERA	595,889	1	595,889	1,89	0,1815
RESIDUOS	7553,9	24	314,746		
TOTAL (CORREGIDO)	24386,8	29			

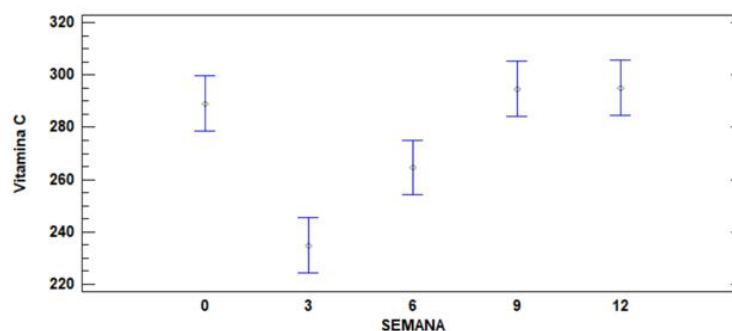
Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

### Pruebas de Múltiple Rangos para Vitamina C por SEMANA

Método: 95,0 porcentaje LSD

SEMANA	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
3	6	234,809	7,24277	X
6	6	264,607	7,24277	X
0	6	289,079	7,24277	X
9	6	294,561	7,24277	X
12	6	295,101	7,24277	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD

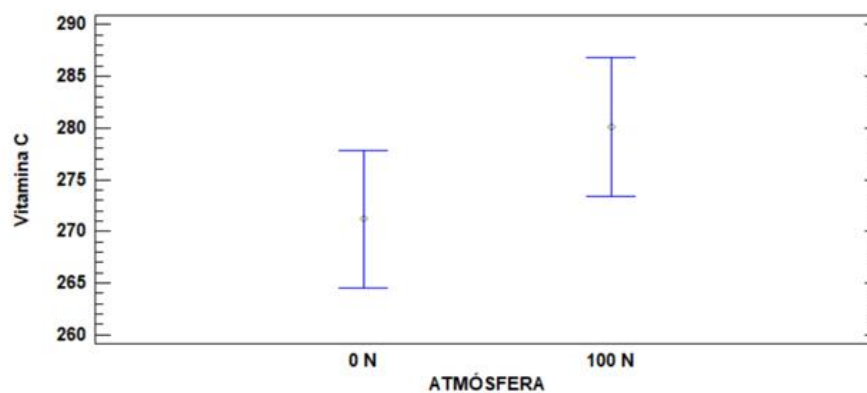


### Pruebas de Múltiple Rangos para Vitamina C por ATMÓSFERA

Método: 95,0 porcentaje LSD

ATMÓSFERA	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
0 N	15	271,175	4,58073	X
100 N	15	280,088	4,58073	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



### Análisis de Varianza para Vitamina E - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:SEMANA	968,603	4	242,151	17,66	0,0000
B:ATMÓSFERA	44,8377	1	44,8377	3,27	0,0831
RESIDUOS	329,16	24	13,715		
TOTAL (CORREGIDO)	1342,6	29			

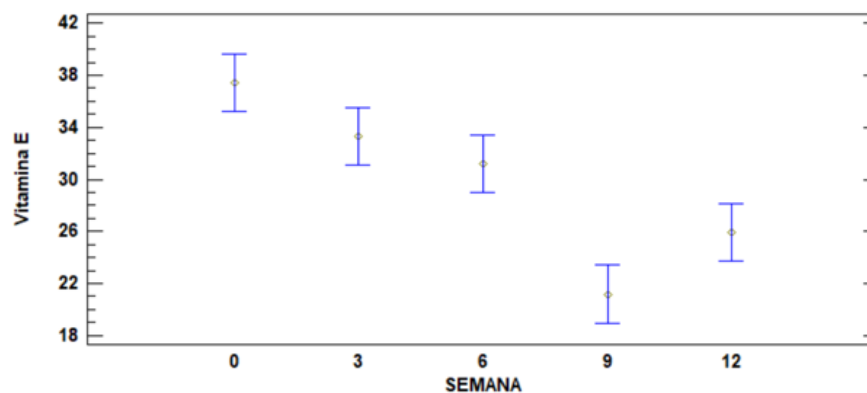
Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

### Pruebas de Múltiple Rangos para Vitamina E por SEMANA

Método: 95,0 porcentaje LSD

SEMANA	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
9	6	21,1853	1,5119	X
12	6	25,9253	1,5119	X
6	6	31,1858	1,5119	X
3	6	33,325	1,5119	XX
0	6	37,4067	1,5119	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD

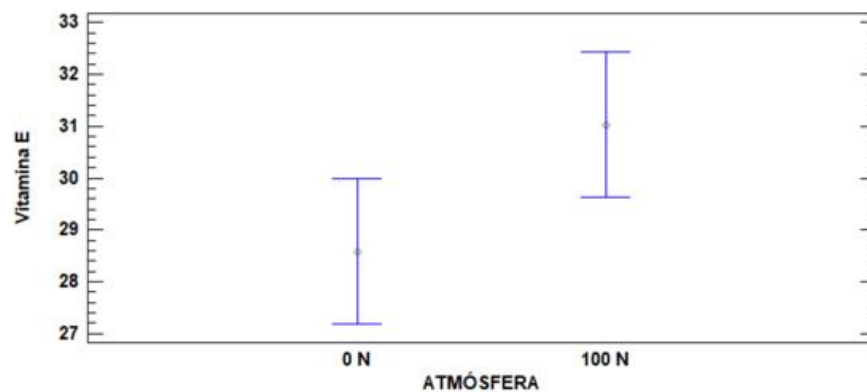


### Pruebas de Múltiple Rangos para Vitamina E por ATMÓSFERA

Método: 95,0 porcentaje LSD

ATMÓSFERA	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
0 N	15	28,5831	0,956208	X
100 N	15	31,0282	0,956208	X

Medias y 95,0% de Fisher LSD



## ANEXO 9

*Tablas ANOVA y Pruebas de Múltiples Rangos para la Digestibilidad in vitro del almidón durante todas las etapas de la digestión*

**Análisis de Varianza para Starch Hydrolysis - Suma de Cuadrados Tipo III**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:TIME	64264,7	10	6426,47	170,49	0,0000
B:SAMPLE	3101,64	1	3101,64	82,29	0,0000
RESIDUOS	2035,44	54	37,6934		
TOTAL (CORREGIDO)	69401,7	65			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

**Pruebas de Múltiple Rangos para Starch Hydrolysis por TIME**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>TIME</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
G30	6	0,976667	2,50644	X
G0	6	1,05167	2,50644	X
G15	6	1,4505	2,50644	X
I0	6	25,1487	2,50644	X
I5	6	41,211	2,50644	X
I10	6	52,6582	2,50644	X
I15	6	55,4762	2,50644	X
I30	6	68,2227	2,50644	X
I60	6	75,7188	2,50644	X
I90	6	80,5282	2,50644	XX
I120	6	85,3413	2,50644	X

**Pruebas de Múltiple Rangos para Starch Hydrolysis por SAMPLE**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	33	37,4887	1,06875	X
Blanched	33	51,1992	1,06875	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Limites</i>
Blanched - Fortified	*	13,7105	3,03026

\* indica una diferencia significativa.

G0**Tabla ANOVA para G0 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0,110433	1	0,110433	0,70	0,4508
Intra grupos	0,633943	4	0,158486		
Total (Corr.)	0,744375	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para G0 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	0,916	X
Blanched	3	1,18733	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified		0,271333	0,902485

\* indica una diferencia significativa.

G15**Tabla ANOVA para G15 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	5,78398	1	5,78398	2,21	0,2115
Intra grupos	10,4793	4	2,61983		
Total (Corr.)	16,2633	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para G15 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	0,468667	X
Blanched	3	2,43233	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified		1,96367	3,66928

\* indica una diferencia significativa.



**G30****Tabla ANOVA para G30 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0,019494	1	0,019494	0,06	0,8132
Intra grupos	1,22425	4	0,306063		
Total (Corr.)	1,24375	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para G30 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	0,919667	X
Blanched	3	1,03367	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified		0,114	1,25415

\* indica una diferencia significativa.

**I0****Tabla ANOVA para I0 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	192,531	1	192,531	4,20	0,1099
Intra grupos	183,533	4	45,8833		
Total (Corr.)	376,064	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para I0 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	19,484	X
Blanched	3	30,8133	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified		11,3293	15,3558

\* indica una diferencia significativa.

I5**Tabla ANOVA para I5 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	125,602	1	125,602	3,01	0,1578
Intra grupos	166,912	4	41,728		
Total (Corr.)	292,514	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para I5 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	36,6357	X
Blanched	3	45,7863	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified		9,15067	14,644

\* indica una diferencia significativa.

I10**Tabla ANOVA para I10 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	687,218	1	687,218	241,90	0,0001
Intra grupos	11,3639	4	2,84097		
Total (Corr.)	698,582	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para I10 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	41,956	X
Blanched	3	63,3603	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified	*	21,4043	3,82101

\* indica una diferencia significativa.

**I15****Tabla ANOVA para I15 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	659,003	1	659,003	225,96	0,0001
Intra grupos	11,6659	4	2,91647		
Total (Corr.)	670,669	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para I15 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	44,996	X
Blanched	3	65,9563	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified	*	20,9603	3,87145

\* indica una diferencia significativa.

**I30****Tabla ANOVA para I30 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	561,247	1	561,247	13,73	0,0207
Intra grupos	163,491	4	40,8726		
Total (Corr.)	724,737	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para I30 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	58,551	X
Blanched	3	77,8943	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified	*	19,3433	14,4931

\* indica una diferencia significativa.

I60**Tabla ANOVA para I60 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	755,667	1	755,667	36,48	0,0038
Intra grupos	82,8632	4	20,7158		
Total (Corr.)	838,53	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para I60 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	64,4963	X
Blanched	3	86,9413	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified	*	22,445	10,318

\* indica una diferencia significativa.

I90**Tabla ANOVA para I90 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	789,388	1	789,388	66,51	0,0012
Intra grupos	47,4746	4	11,8686		
Total (Corr.)	836,863	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para I90 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	69,058	X
Blanched	3	91,9983	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified	*	22,9403	7,8099

\* indica una diferencia significativa.

**I120****Tabla ANOVA para I120 por SAMPLE2**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	654,797	1	654,797	100,45	0,0006
Intra grupos	26,0755	4	6,51887		
Total (Corr.)	680,873	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para I120 por SAMPLE2**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE2</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	74,8947	X
Blanched	3	95,788	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Blanched - Fortified	*	20,8933	5,78803

\* indica una diferencia significativa.

## ANEXO 10

*Tablas ANOVA y Pruebas de Múltiples Rangos para las Propiedades de Empastamiento de los chips fortificados (Fortified) y sin fortificar (Unfortified)*

**Pico de viscosidad máxima (Peak viscosity)**

**Tabla ANOVA para Peak viscosity por Col 1**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	723843,	1	723843,	1308,15	0,0000
Intra grupos	2213,33	4	553,333		
Total (Corr.)	726056,	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Peak viscosity por Col 1**

Método: 95,0 porcentaje LSD

Col 1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fortified	3	733,667	X
Unfortified	3	1428,33	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Limites
Fortified - Unfortified	*	-694,667	53,3259

\* indica una diferencia significativa.

**Viscosidad de la pasta caliente (Trough viscosity)**

**Tabla ANOVA para Trough viscosity por Col 1**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	590321,	1	590321,	841,71	0,0000
Intra grupos	2805,33	4	701,333		
Total (Corr.)	593126,	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Trough viscosity por Col 1**

Método: 95,0 porcentaje LSD

Col 1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fortified	3	690,333	X
Unfortified	3	1317,67	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Limites
Fortified - Unfortified	*	-627,333	60,0353

\* indica una diferencia significativa.

### Índice de inestabilidad del gel (Breakdown)

**Tabla ANOVA para Breakdown viscosity por Col\_1**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	6800,67	1	6800,67	118,62	0,0004
Intra grupos	229,333	4	57,3333		
Total (Corr.)	7030,0	5			

#### **Pruebas de Múltiple Rangos para Breakdown viscosity por Col\_1**

Método: 95,0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fortified	3	43,3333	X
Unfortified	3	110,667	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Fortified - Unfortified	*	-67,3333	17,1652

\* indica una diferencia significativa.

### Índice de estabilidad del gel (Setback)

**Tabla ANOVA para Setback viscosity por Col\_1**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	463704,	1	463704,	2856,49	0,0000
Intra grupos	649,333	4	162,333		
Total (Corr.)	464353,	5			

#### **Pruebas de Múltiple Rangos para Setback viscosity por Col\_1**

Método: 95,0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fortified	3	447,667	X
Unfortified	3	1003,67	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Fortified - Unfortified	*	-556,0	28,8834

\* indica una diferencia significativa.

**Viscosidad Final (Final viscosity)****Tabla ANOVA para Final viscosity por Col 1**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	2,10042E6	1	2,10042E6	1734,93	0,0000
Intra grupos	4842,67	4	1210,67		
Total (Corr.)	2,10526E6	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Final viscosity por Col 1**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Col_1</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	1138,0	X
Unfortified	3	2321,33	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Limites</i>
Fortified - Unfortified	*	-1183,33	78,8782

\* indica una diferencia significativa.

**Temperatura de empastamiento (Pasting temperature)****Tabla ANOVA para Pasting temperature por Col 1**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	348,386	1	348,386	49,46	0,0022
Intra grupos	28,1779	4	7,04448		
Total (Corr.)	376,564	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Pasting temperature por Col 1**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Col_1</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Unfortified	3	73,9833	X
Fortified	3	89,2233	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Limites</i>
Fortified - Unfortified	*	15,24	6,01685

\* indica una diferencia significativa.



## ANEXO 11

*Tablas ANOVA y Pruebas de Múltiples Rangos para el Poder de Hinchamiento y Solubilidad de los chips fortificados (Fortified) y sin fortificar (Unfortified)*

*Poder de hinchamiento (Swelling power)*

**Tabla ANOVA para Swellig Power por SAMPLE**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	11,5437	1	11,5437	209,78	0,0001
Intra grupos	0,220116	4	0,0550289		
Total (Corr.)	11,7638	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Swellig Power por SAMPLE**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Fortified	3	8,58896	X
Unfortified	3	11,3631	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Fortified - Unfortified	*	-2,77413	0,53179

\* indica una diferencia significativa.

*Solubilidad (Solubility)*

**Tabla ANOVA para Solubility por SAMPLE**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	42,921	1	42,921	110,49	0,0005
Intra grupos	1,55389	4	0,388472		
Total (Corr.)	44,4749	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Solubility por SAMPLE**

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>SAMPLE</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Unfortified	3	10,3034	X
Fortified	3	15,6526	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Fortified - Unfortified	*	5,34921	1,41294

\* indica una diferencia significativa.

## ANEXO 12

*Tablas ANOVA y Pruebas de Múltiples Rangos para el Índice de Hidrólisis (HI) y el Índice Glucémico estimado (eGI) de los chips fortificados (Fortified) y sin fortificar (Unfortified)*

**Índice de Hidrólisis (HI)**

**Tabla ANOVA para HI por SAMPLE**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	628,961	1	628,961	61,84	0,0014
Intra grupos	40,6801	4	10,17		
Total (Corr.)	669,641	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para HI por SAMPLE**

Método: 95,0 porcentaje LSD

SAMPLE	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fortified	3	60,0907	X
Unfortified	3	80,5677	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Fortified - Unfortified	*	-20,477	7,22946

\* indica una diferencia significativa.

**Índice Glucémico estimado (eGI)**

**Tabla ANOVA para eGI por SAMPLE**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	189,563	1	189,563	61,83	0,0014
Intra grupos	12,2634	4	3,06586		
Total (Corr.)	201,826	5			

**Pruebas de Múltiple Rangos para eGI por SAMPLE**

Método: 95,0 porcentaje LSD

SAMPLE	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fortified	3	72,7	X
Unfortified	3	83,9417	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Fortified - Unfortified	*	-11,2417	3,96936

\* indica una diferencia significativa.

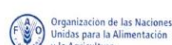
## ANEXO 13

*Productos académicos y divulgación*PARTICIPATION **Yudy Duarte**

## CERTIFICATE

has participated with the Poster Presentation entitled "The response of potato (*Solanum tuberosum*) to vacuum impregnation" at the 10<sup>th</sup> World Potato Congress and the XXVIII Latin American Potato Association Congress held in Cusco, Peru, from 27<sup>th</sup> - 31<sup>st</sup> May 2018.

WPC Inc. INIA Peru ALAP





J Food Sci Technol  
<https://doi.org/10.1007/s13197-019-04188-5>



ORIGINAL ARTICLE

## Potato snacks added with active components: effects of the vacuum impregnation and drying processes

Yudy Duarte-Correa<sup>1</sup> · Diana Granda-Restrepo<sup>1</sup> · Misael Cortés<sup>2</sup> · Oscar Vega-Castro<sup>1,3</sup>

### Post harvest and Processing Technology

#### 1. The response of potato (*Solanum tuberosum*) to vacuum impregnation

Yudy Duarte<sup>1</sup>, Melisa Jaramillo<sup>2</sup>, Misael Cortés<sup>2</sup> and Oscar Vega<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Antioquia, Colombia

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Innovative Food Science and Emerging Technologies 64 (2020) 102437



Contents lists available at ScienceDirect

Innovative Food Science and Emerging Technologies

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ifset](http://www.elsevier.com/locate/ifset)



Development of fortified low-fat potato chips through Vacuum Impregnation and Microwave Vacuum Drying



Y. Duarte-Correa<sup>a</sup>, A. Díaz-Osorio<sup>a</sup>, J. Osorio-Arias<sup>a</sup>, Paulo J.A. Sobral<sup>b,c</sup>, O. Vega-Castro<sup>a,\*</sup>



El suscrito Director de Publicaciones de la  
Corporación Universitaria Americana sede Medellín

### CERTIFICA

Que, fueron revisados los soportes del libro titulado “*Estudios interdisciplinarios de investigación en Ingeniería*” (111 páginas), registrado con ISBN 978-958-5512-02-3, publicado en el mes de agosto del año 2018, a través del Sello Editorial Coruniamericana de la Corporación Universitaria Americana. Del texto hace parte el capítulo de libro resultado de investigación “*Residuos agroindustriales: aplicaciones de la ingeniería para la generación de valores agregados*” (páginas 47-70) de autoría de Oscar Alfonso Vega Castro, Edwin Alberto Arcila, Juan Camilo Osorio Arias, Yudy Stella Duarte Correa y Faber Alexander Gómez Narváez, el cual cumplió con los requisitos establecidos en la Guía de verificación Libros y Capítulos en Libros Resultado de Investigación<sup>1</sup>, por lo que se valida el texto como tal.

Dado en Medellín, a los 20 días del mes de febrero de 2019.

**JOVANY ARLEY SEPÚLVEDA AGUIRRE**  
Director de Publicaciones  
Corporación Universitaria Americana  
Sede Medellín



<sup>1</sup> Modelo de Medición de Grupos de Investigación, Desarrollo Tecnológico o de Innovación y de Reconocimiento de Investigadores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación año 2017.





El suscrito Director de Publicaciones de la  
Corporación Universitaria Americana sede Medellín

### CERTIFICA

Que, fueron revisados los soportes del libro titulado *“Estudios interdisciplinarios de investigación en Ingeniería”* (111 páginas), registrado con ISBN 978-958-5512-02-3, publicado en el mes de agosto del año 2018, a través del Sello Editorial Coruniamericana de la Corporación Universitaria Americana. Del texto hace parte el capítulo de libro resultado de investigación *“Productos naturales como fuente de materias primas para la elaboración de envases activos”* (páginas 71-90) de autoría de Diana María Granda-Restrepo, Camilo Agudelo Cuartas, Ángela María Pérez Martínez, Yudy Stella Duarte Correa y Oscar Vega-Castro, el cual cumplió con los requisitos establecidos en la Guía de verificación Libros y Capítulos en Libros Resultado de Investigación<sup>1</sup>, por lo que se valida el texto como tal.

Dado en Medellín, a los 20 días del mes de febrero de 2019.

**JOVANY ARLEY SEPÚLVEDA AGUIRRE**  
Director de Publicaciones  
Corporación Universitaria Americana  
Sede Medellín



<sup>1</sup> Modelo de Medición de Grupos de Investigación, Desarrollo Tecnológico o de Innovación y de Reconocimiento de Investigadores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación año 2017.

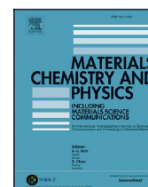




ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Materials Chemistry and Physics

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/matchemphys](http://www.elsevier.com/locate/matchemphys)

## New powder material obtained from spent coffee ground and whey protein; Thermal and morphological analysis



J. Osorio-Arias<sup>a</sup>, S. Delgado-Arias<sup>a</sup>, Y. Duarte-Correa<sup>a</sup>, E. Largo-Ávila<sup>b</sup>, D. Montaña<sup>c</sup>,  
Ricardo Simpson<sup>d</sup>, O. Vega-Castro<sup>a,c,\*</sup>