



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC**



**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS**

**“ELABORACIÓN DE UN ALIMENTO  
BALANCEADO EXTRUDIDO PARA GANADO  
BOVINO USANDO RESIDUOS  
AGROINDUSTRIALES DE PIÑA”**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS EN ALIMENTOS.**

PRESENTA:  
**IBQ. FERNANDO ARAGÓN GUTIÉRREZ**

DIRECTOR:  
**DR. JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA**

CO-DIRECTOR INTERNO:  
**DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO**

CO-DIRECTOR EXTERNO:  
**DR. VÍCTOR MEZA VILLALVAZO**

**TUXTEPEC, OAXACA. OCTUBRE 2022.**

**Autorización de Presentación Electrónica de Tesis**

San Juan Bautista Tuxtepec, Oax., **03/Noviembre/2022**

Oficio No. DEP/CT-6193

**C. FERNANDO ARAGÓN GUTIERREZ**  
**EGRESADO DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS**  
**CON NÚMERO DE CONTROL M15350033**  
**P R E S E N T E**

POR MEDIO DE LA PRESENTE ME PERMITO COMUNICARLE QUE EL COMITÉ TUTORIAL INTEGRADO POR LOS CC. JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA, JUAN GABRIEL TORRUCO UCO, VÍCTOR MEZA VILLALVAZO, BETSABÉ HÉRNANDEZ SANTOS Y ERNESTINA PAZ GAMBOA, REVISÓ Y APROBÓ EN SU TOTALIDAD EL TRABAJO PROFESIONAL DENOMINADO "ELABORACIÓN DE UN ALIMENTO BALANCEADO EXTRUDIDO PARA GANADO BOVINO USANDO RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE PIÑA." PRESENTADO POR USTED COMO PRODUCTO DE TESIS DE ACUERDO AL LINEAMIENTO DE TITULACIÓN CORRESPONDIENTE, PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN ALIMENTOS.

POR LO ANTERIOR Y DE ACUERDO A LOS LINEAMIENTOS INSTITUCIONALES SE LE DA TRÁMITE LEGAL PARA QUE PROCEDA A LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO PROFESIONAL.

**ATENTAMENTE**  
*Excelencia en Educación Tecnológica.*

  
**JULIÁN KURI MÁR**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

ccp. Dpto. Servicios Escolares  
Archivo  
MMHC/mdom\*

 **EDUCACIÓN** |  **TECNOLÓGICO**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA | NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC**

**SUBDIRECCIÓN**  
**ACADÉMICA**

 **EDUCACIÓN** |  **TECNOLÓGICO**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA | NACIONAL DE MÉXICO  
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC**

**04 NOV. 2022**

**DEPARTAMENTO**  
**QUÍMICA Y BIOQUÍMICA**  
**R E C I B I D O**



Av. Dr. Víctor Bravo Ahuja Num. 561, Col. Predio el Paraíso, C.P.68350 Tuxtepec, Oaxaca  
Tel. (287) 8751044 y (287) 51880 e-mail: cyd\_tuxtepec@tecnm.mx | tuxtepec.tecnm.mx



# CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
Instituto Tecnológico de Tuxtepec

## Carta de Cesión de Derechos Autorales

Tuxtepec, Oaxaca **03/NOVIEMBRE/2022**

Título de la Tesis	Elaboración de un alimento balanceado extrudido para ganado bovino usando residuos agroindustriales de piña
Autor principal	Fernando Aragon Gutierrez
Email de contacto	fer511463@gmail.com
No. de Control	M15350033
Director de Tesis	Dr. Jesús Rodríguez Miranda
Registro ISBN / ISSN (Cuando aplique)	

Por este conducto manifiesto que es mi libre voluntad el ceder los derechos patrimoniales relativos a la obra literaria de la cual soy el autor, a favor del Tecnológico Nacional de México / Campus Tuxtepec; para que sea publicada, sin más límites que los establecidos en la Ley Federal del Derecho de Autor.

Extiendo la presente para los fines legales a que haya lugar.

Atentamente

Autor: Fernando Aragon Gutierrez

Firma



# DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

Yo, **Fernando Aragon Gutierrez** con Número de control: **M15350033**, RFC: **AAGF9608283Y6**, alumno de la Maestría en Ciencias en Alimentos, del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtepec, autor (a) de la Tesis titulada "**Elaboración de un alimento balanceado extrudido para ganado bovino usando residuos agroindustriales de piña**".

DECLARO QUÉ:

1. El presente trabajo de investigación y tema de la tesis presentada para la obtención del Título de Maestro en Ciencias en Alimentos es original y asignado por mi Director de tesis el **Dr. Jesús Rodríguez Miranda**, siendo resultado de mi trabajo experimental y escritura personal, el cual no he copiado de otro trabajo de investigación, ni utilizado ideas, fórmulas, ni citas completas, así como ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa). Caso contrario, menciono de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor.

2. Declaro que el trabajo de investigación que pongo en consideración para evaluación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título, ni ha sido publicado en sitio alguno.

3. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones administrativas y/o legales por parte del Instituto, por lo que, asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en la tesis, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Asimismo, me hago responsable ante la Institución o terceros, de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado. De identificarse falsificación, plagio, fraude o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtepec.

Tuxtepec, Oaxaca a 03 de Noviembre del 2022.



IBQ. Fernando Aragón Gutiérrez.

NOMBRE Y FIRMA

**ELABORACIÓN DE UN ALIMENTO BALANCEADO EXTRUDIDO  
PARA GANADO BOVINO USANDO RESIDUOS  
AGROINDUSTRIALES DE PIÑA**

**Por:**

**IBQ. FERNANDO ARAGÓN GUTIÉRREZ**

Tesis propuesta al Instituto Tecnológico de Tuxtepec

Como requerimiento para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Alimentos

Octubre, 2022.

## **DEDICATORIAS**

A mis padres, mi hermano, mi novia Zuleima y mi abuela, son las personas que más amo y de las que siempre recibí apoyo incondicional, aun en las situaciones más difíciles, jamás me han dejado solo. Este logro se los dedico de una manera muy especial, ya que representa esfuerzo y dedicación y que de alguna u otra forma este logro también es de ustedes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada, para la realización del presente trabajo de investigación.

Un agradecimiento especial a mi director de tesis Dr. Jesús Rodríguez Miranda, por la dedicación y confianza brindada para llevar a cabo este proyecto de investigación, por mostrar en todo momento disponibilidad, así como los conocimientos y consejos brindados para mi formación profesional.

A mi co-director de tesis Dr. Juan Gabriel Torruco Uco, por apoyarme en la mejora del proyecto lo cual me permitió culminar satisfactoriamente mi trabajo de investigación.

A mis sinodales Dra. Betsabé Hernández Santos y MCA. Ernestina Paz Gamboa, por las contribuciones otorgadas para la mejora de la investigación.

A mis padres Fernando y Minerva quienes siempre me apoyaron desde el inicio, son mi inspiración y mi motivo para ser mejor cada día.

A mi novia Zuleima que siempre estuvo a mi lado que siempre me apoyo, por su comprensión y cariño.

## RESUMEN

La región del Papaloapan es una zona productora de piña (*Ananas comosus* L.), la cual genera grandes cantidades de residuos agroindustriales, produciendo contaminación y pérdidas económicas, por ello una alternativa es ser utilizados en la elaboración de alimentos para rumiantes. Los alimentos balanceados utilizados en la ganadería son principalmente pellets y extrudidos, siendo el proceso de extrusión el más utilizado, aumentando la digestibilidad y capacidad nutricional de los alimentos. Por lo que, el objetivo de este trabajo es elaborar un alimento balanceado para ganado bovino aprovechando los desechos agroindustriales de piña (*A. comosus*) de la región, utilizando el proceso de extrusión. Las formulaciones del alimento balanceado se realizaron con un 25% de polvo de residuos agroindustriales de piña (RAP) y una dieta control (DC) al 25% de harina de alfalfa, se empleó un diseño central compuesto con dos variables independientes (temperatura, 120-150 °C y humedad, 16-22%), la extrusión se llevó a cabo en un extrusor de un tornillo, como variables de respuestas: (proteína, fibra, índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), dureza (DU), grado de gelatinización (GG), color, pH, índice de absorción de agua (IAA) y solubilidad en agua (ISA)). Los resultados de los extrudidos RAP fueron: el contenido de proteína fue de 4.38 a 9.11%, fibra 8.07 a 12.14%, IE osciló entre 1.06 a 1.11, DA estuvo entre 0.94 a 1.13 g/cm<sup>3</sup>, la DU osciló entre 53.83 a 85.75 N, IAA 3.24 a 3.93 g/g, ISA 11.59 a 14.07%, pH 5.49-5.65,  $\Delta E$  11.87 a 16.38, GG 0.88 a 5.71%. Mientras que los resultados de los extrudidos DC fueron: el contenido de proteína fue de 9.28 a 12.54%, fibra 10.18 a 12.15%, IE osciló entre 0.89 a 1.14, DA estuvo entre 0.94 a 1.45 g/cm<sup>3</sup>, la DU osciló entre 44.99 a 70.34 N, IAA 3.36 a 4.46 g/g, ISA 6.05 a 8.31%, pH 6.09-6.23,  $\Delta E$  7.06 a 9.01, GG 0.81 a 2.97%. Los resultados de RAP indicaron que el IE y proteína se vieron significativamente afectados por la humedad ya que, presentó efecto significativo ( $p < 0.05$ ) en su término lineal, por otra parte, IAA, ISA, pH,  $\Delta E$ , proteína y fibra se vieron significativamente afectados por la temperatura mostrando un efecto significativo ( $p < 0.05$ ). En cambio, en los extrudidos DC Los resultados de RAP indicaron que el DA y DU se vieron significativamente afectados por la humedad ya que, mostraron efecto significativo ( $p < 0.05$ ) en su término lineal, por otra parte, IAA, ISA, pH,  $\Delta E$ , IE y proteína se vieron

significativamente afectados por la temperatura que presentó efecto significativo ( $p < 0.05$ ). La optimización numérica se realizó tomando en cuenta el máximo de proteína, fibra, IAA, ISA y GG. Las condiciones óptimas de los productos optimizados fueron: humedad (17.31%) para DC (18.4%), todas a una temperatura de 150 °C. Los extrudidos con RAP presentaron un mayor grado de gelatinización y un mayor porcentaje de solubilidad, lo cual es favorable para la producción del alimento y la solubilidad del alimento.

## ABSTRACT

The Papaloapan region is a pineapple (*Ananas comosus* L.) producing area, which generates large amounts of agro-industrial waste, causing pollution and economic losses, so an alternative is to be used in the production of feed for ruminants. The balanced feeds used in livestock are mainly pellets and extruded, the extrusion process being the most used, increasing the digestibility and nutritional capacity of the feed. Therefore, the objective of this work is to prepare a balanced feed for cattle using the agro-industrial waste of pineapple (*A. comosus*) from the region, using the extrusion process. The balanced feed formulations were made with 25% pineapple agro-industrial waste powder (PAWP) and a control diet (CD) with 25% alfalfa flour, a central composite design with two independent variables was used (temperature, 120 -150 °C and humidity, 16-22%), the extrusion was carried out in a single-screw extruder, as response variables: (Protein, Fiber, Expansion Index (EI), bulk density (BD), hardness (H), degree of gelatinization (DG), color, pH, water absorption index (WAI) and water solubility (WSI)). The results of the PAWP extrudates were: protein content was from 4.38 to 9.11%, fiber 8.07 to 12.14%, EI ranged from 1.06 to 1.11, BD was between 0.94 to 1.13 g/cm<sup>3</sup>, H ranged from 53.83 to 85.75 N, WAI 3.24 to 3.93 g/g, WSI 11.59 to 14.07%, pH 5.49-5.65, ΔE 11.87 to 16.38, DG 0.88 to 5.71%. While the results of the CD extrudates were: protein content was from 9.28 to 12.54%, fiber 10.18 to 12.15%, EI ranged from 0.89 to 1.14, BD was between 0.94 to 1.45 g/cm<sup>3</sup>, H ranged from 44.99 to 70.34 N, WAI 3.36 to 4.46 g/g, WSI 6.05 to 8.31%, pH 6.09-6.23, ΔE 7.06 to 9.01, GG 0.81 to 2.97%. The PAWP results indicated that EI and protein were significantly affected by moisture, presenting a significant effect ( $p<0.05$ ) in its linear term, on the other hand, WAI, WSI, pH, ΔE, protein and fiber were significantly affected by moisture. temperature had a significant effect ( $p<0.05$ ). On the other hand, in the CD extrudates, the PAWP results indicated that BD and H were significantly affected by humidity, presenting a significant effect ( $p<0.05$ ) in its linear term, on the other hand, WAI, WSI, pH, ΔE, IE and protein were significantly affected by temperature, presenting a significant effect ( $p<0.05$ ). Numerical optimization was performed considering the maximum of protein, fiber, WAI, WSI and DG. The

optimal conditions of the optimized products were humidity (17.31%) for CD (18.4%), all at a temperature of 150 °C. The extrudates with PAWP presented a higher degree of gelatinization and a higher percentage of solubility, which is favorable for feed production and feed solubility.

# ÍNDICE

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS .....	3
DEDICATORIAS .....	6
AGRADECIMIENTOS .....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT .....	10
ÍNDICE .....	12
ÍNDICE DE TABLAS .....	15
ÍNDICE DE FIGURAS .....	16
I. INTRODUCCIÓN .....	17
II. MARCO TEÓRICO .....	18
2.1. GANADO BOVINO .....	18
2.2. PRODUCCIÓN NACIONAL DEL GANADO BOVINO .....	18
2.3. FISIOLÓGÍA DIGESTIVA DE LOS RUMIANTES. ....	19
2.4. LA DIGESTIÓN FERMENTATIVA. ....	20
2.5. APARATO DIGESTIVO DE LOS RUMIANTES.....	21
2.5.1. DESARROLLO DEL APARATO DIGESTIVO .....	21
2.6. ESÓFAGO .....	21
2.7. RUMEN Y RETÍCULO .....	22
2.8. MICROORGANISMOS DEL RUMEN .....	22
2.9. EL pH RUMINAL DEBE REGULARSE PARA EFECTIVIZAR LA DEGRADACIÓN RUMINAL DEL ALIMENTO. ....	24
2.10. METABOLISMO RUMINAL DE LOS HIDRATOS DE CARBONO.....	25
2.11. METABOLISMO RUMINAL DE LOS COMPUESTOS NITROGENADOS .....	26
2.12. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DE BOVINOS .....	28
2.13. REQUERIMIENTOS DE MANTENCIÓN.....	29
2.14. REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN .....	29
2.15. FORMULACIÓN DE ALIMENTOS BALANCEADO .....	29
2.16. FORMULACIÓN DE DIETA.....	31
2.17. PROCESOS DE ELABORACIÓN DE BALANCEADOS .....	31
2.18. EXTRUSIÓN .....	31
2.19. PARTES DE UN EXTRUSOR.....	32
2.19.1. EL TORNILLO DE EXTRUSIÓN.....	32
2.19.2. CILINDRO .....	33

2.19.3. TOLVA DE ALIMENTACIÓN.....	34
2.19.4. TOLVA.....	34
2.19.5. PLATO ROMPEDOR Y FILTROS.....	35
2.19.6. CABEZAL Y BOQUILLA.....	35
2.20. PARÁMETROS DURANTE EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	36
2.20.1. TEMPERATURA.....	36
2.20.2. PRESIÓN.....	36
2.20.3. TIEMPO.....	37
2.20.4. VELOCIDAD DE TORNILLO.....	37
2.21. VARIABLES DE OPERACIÓN.....	37
2.22. APLICACIONES DE LA EXTRUSIÓN.....	38
2.23. ALIMENTOS PARA CONSUMO ANIMAL.....	38
2.24. TEXTURA.....	39
2.25. PIÑA ( <i>Ananas comosus L.</i> ).....	39
2.26. PRODUCCIÓN DE PIÑA.....	40
2.27. FIBRAS NATURALES.....	41
2.27.1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS HOJAS Y FIBRAS DE LA PIÑA.....	42
2.28. SUPLEMENTO ALIMENTICIO PARA BOVINOS.....	42
2.29. RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS PARA ANIMALES.....	43
2.30. RESIDUOS DE PIÑA ( <i>Ananas comosus</i> ).....	45
III. ANTECEDENTES.....	48
IV. JUSTIFICACIÓN.....	51
V. OBJETIVOS.....	52
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	53
6.1. OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	53
6.2. POLVO DE CÁSCARA DE PIÑA.....	53
6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	53
6.4. FORMULACIÓN DE DIETA.....	53
6.5. PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	54
6.6. ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (EME).....	54
6.7. TORQUE.....	55
6.8. TIEMPO DE RESIDENCIA.....	55
6.9. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL ALIMENTO EXTRUDIDO.....	55
6.9.1 DENSIDAD APARENTE Y ÍNDICE DE EXPANSIÓN.....	55

6.9.2. DETERMINACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS EXTRUIDOS .....	55
6.9.3. DUREZA .....	56
6.9.4. DETERMINACIÓN DE GRADO DE GELATINIZACIÓN .....	56
6.9.5. DETERMINACIÓN DE COLOR .....	56
6.9.6. ÍNDICES DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA) Y DE SOLUBILIDAD EN AGUA (ISA).....	57
6.10. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	57
6.11. OPTIMIZACIÓN .....	58
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	59
7.1. OBTENCIÓN DEL POLVO DE SUBPRODUCTOS DE PIÑA .....	59
7.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MATERIAS PRIMA .....	59
7.3. ELABORACION DE LAS DIETAS A EXTRUDIR .....	60
7.4. PARÁMETROS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN .....	60
7.5. PARÁMETROS FÍSICOS DE LAS DIETAS EXTRUDIDAS .....	67
7.6. PROPIEDADES FUNCIONALES DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS. ....	75
7.7 COLOR DE LAS DIETAS EXTRUDIDAS .....	84
7.8 GRADO DE GELATINIZACIÓN (GG) DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS 90	
7.9 ANÁLISIS QUÍMICO PROXIMAL DE LAS DIETAS EXTRUDIDAS .....	94
7.10 OPTIMIZACIÓN DE LAS DIETAS EXTRUDIDAS. ....	100
VIII. CONCLUSIONES.....	102
REFERENCIAS.....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
1	Población de ganado bovino millones de cabeza.	19
2	Composición nutricional de la piña.	47
3	Formulación de dietas.	54
4	Rendimiento de las materias primas.	59
5	Composición química proximal de las materias primas.	59
6	Diseño experimental para ambas dietas.	60
7	Parámetros del proceso de extrusión de las dietas extrudidas.	61
8	Coefficientes estimados por regresión lineal múltiple de los parámetros del proceso de extrusión de las dietas extrudidas.	63
9	Parámetros físicos de las dietas extrudidas dieta con piña y dieta control.	68
10	Coefficientes estimados por regresión lineal múltiple de los parámetros físicos de las dietas extrudidas.	69
11	Propiedades funcionales y pH de dieta con piña y dieta control.	75
12	Coefficientes estimados por regresión lineal múltiple de las propiedades funcionales de los extrudidos.	76
13	Análisis de color de los extrudidos dieta con piña.	84
14	Análisis de color de los extrudidos dieta control.	85
15	Coefficientes estimados por regresión lineal múltiple de color de dieta con piña y dieta control.	86
16	Grado de gelatinización de los extrudidos con piña y dieta control.	90
17	Coefficientes estimados por regresión lineal múltiple del grado de gelatinización de los extrudidos.	91
18	Composición química proximal de dieta con piña.	95
19	Composición química proximal de dieta control.	95
20	Coefficientes estimados por regresión lineal múltiple del contenido de fibra y proteína.	96
21	Optimización del proceso de las dietas extrudidas.	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

No.	Descripción	Pág.
1	Mecanismos de absorción de AGV en rumen.	25
2	Tornillo de extrusora.	33
3	Sistema cilindro de calefacción-tornillo.	33
4	Diagrama de Pareto de la energía mecánica específica de los extrudidos DP.	62
5	Diagrama de Pareto de la energía mecánica específica de los extrudidos DC.	62
6	Diagrama de Pareto del tiempo de residencia de los extrudidos DP.	64
7	Diagrama de Pareto del tiempo de residencia de los extrudidos DC.	65
8	Diagrama de Pareto del torque de los extrudidos DP.	66
9	Diagrama de Pareto del torque de los extrudidos DC.	67
10	Diagrama de Pareto del índice de expansión de los extrudidos DP.	69
11	Diagrama de Pareto del índice de expansión de los extrudidos DC.	70
12	Diagrama de Pareto de la densidad aparente de los extrudidos DP.	71
13	Diagrama de Pareto de la densidad aparente de los extrudidos DC.	71
14	Diagrama de Pareto de la dureza de los extrudidos DP.	73
15	Diagrama de Pareto de la dureza de los extrudidos DC.	74
16	Diagrama de Pareto del índice de absorción de agua de los extrudidos DP.	77
17	Diagrama de Pareto del índice de absorción de agua de los extrudidos DC.	77
18	Diagrama de Pareto del índice de solubilidad en agua de los extrudidos DP.	79
19	Diagrama de Pareto del índice de solubilidad en agua de los extrudidos DC.	80
20	Diagrama de Pareto del pH de los extrudidos DP.	82
21	Diagrama de Pareto del pH de los extrudidos DC.	83
22	Fotografía de extrudidos de la dieta con polvo de cascara de piña.	85
23	Fotografía de extrudidos de la dieta control.	86
24	Diagrama de Pareto para los extrudidos DP, para los parámetros de color (a) $L^*$ , b) $a^*$ , c) $b^*$ , d) $C^*$ , e) $h^\circ$ , f) $\Delta E$ ).	88
25	Diagrama de Pareto para los extrudidos DC, para los parámetros de color (a) $L^*$ , b) $a^*$ , c) $b^*$ , d) $C^*$ , e) $h^\circ$ , f) $\Delta E$ ).	89
26	Diagrama de Pareto para los extrudidos DP del grado de gelatinización.	92
27	Diagrama de Pareto para los extrudidos DC del grado de gelatinización.	93
28	Diagrama de Pareto del contenido de proteínas de extrudidos DP.	98
29	Diagrama de Pareto del contenido de proteínas de extrudidos DC.	98
30	Diagrama de Pareto del contenido de fibra de los extrudidos DP.	99
31	Diagrama de Pareto del contenido de fibra de los extrudidos DC.	101

## I. INTRODUCCIÓN

La ganadería es una de las actividades más importantes del municipio de Tuxtepec Oaxaca, debido a la gran cantidad de praderas naturales que permiten el pastoreo y cría de ganado. En México se explotan alrededor de treinta razas bovinas que son destinadas para uso cárnico, entre las más importantes se encuentran: Angus, Hereford, Charolais, Nelore, Pardo Suizo Europeo y Angus. Y dentro de la producción lechera bovina las razas que destacan para esta actividad son Holstein Fresian y Pardo Suiza Americana. La carne es el principal producto que se extrae del ganado bovino y México produce casi 2 millones de toneladas al año de las cuales casi el 85% se exporta a los Estados Unidos. Los principales estados productores de carne de res son Veracruz con 249 mil toneladas y Jalisco con 209 mil toneladas al año, le siguen estados como Chiapas, Sinaloa y Baja California (Rural, 2019). El potencial de mitigación en sistemas de producción bovina puede ser mayor de 20-40% de los niveles actuales, siempre que se puedan adaptar prácticas destinadas a mejorar el manejo de las praderas, la alimentación de los animales. La ganadería extensiva tiene un gran potencial de secuestro de carbono a través de las praderas (Hernández et al., 2020). Por lo tanto, la necesidad de optimizar la eficiencia del comportamiento productivo animal ha estimulado el interés en la complementación del valor nutricional de diferentes formulaciones utilizadas en la alimentación bovina. Para lograrlo, es necesario evaluar la eficiencia de diferentes formulaciones obtenidas con base en la gran variedad de materias primas disponibles en la región. Es por ello que los residuos vegetales son una fuente rica de compuestos bioactivos como la fibra dietética, está constituida principalmente de biopolímeros, como lo es la hemicelulosa, celulosa, lignina, pectina y otras gomas que varían en proporción dependiendo de la fuente (Rasgado-Vázquez et al., 2016). Por otra parte, los residuos y subproductos presentan severas limitaciones tanto de tipo físico como químico por lo que se debe incorporarlos en los porcentajes que permitan el máximo de expresión productiva por parte del animal. En cuanto a el proceso de extrusión es uno de los más utilizado en la producción de alimentos balanceados para animales, es un proceso tecnológico utilizado para la elaboración y modificación de la calidad nutritiva en varios productos (Fernández-Mayer, 2015).

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. GANADO BOVINO**

El ganado bovino, o vacas (hembras) y toros (machos), son el tipo más común de grandes animales domesticados por el hombre. Son un miembro moderno de la subfamilia Bovinae, son las especies más grandes del género Bos y estas se clasifican más comúnmente colectivamente como Bos Taurus.

El ganado se cría comúnmente como ganado para carne (carne de res o ternera, ver ganado de carne), leche, pieles y otros derivados, que se utilizan para fabricar cuero. Se utilizan principalmente como animales de montar y de tiro (bueyes o bueyes, que tiran de carros, arados y otros implementos). Otro producto del ganado es su estiércol, que se puede utilizar para crear abono o combustible. En algunas regiones del mundo, como partes de la India, el ganado tiene un significado religioso significativo. El ganado, en su mayoría de razas pequeñas como el cebú miniatura, también se utilizan como mascota (Bollongino, 2012).

El hombre domesticó al ganado bovino hace siglos. Aprovechó su fuerza para la agricultura y se alimenta con la carne y la leche que le proporciona. En la actualidad la ganadería se practica en todo el mundo. La continua búsqueda por mejorar la calidad hay una serie de factores, como la raza, la cría o la engorda, la edad del animal y el sacrificio, así como los días inmediatamente antes y después. En Europa predominan las razas mixtas, con buenos rendimientos de carne y de leche. En América y en Australia, por el contrario, es más común la producción de ganado bovino para carne (Cinfovcljc, 2014).

### **2.2. PRODUCCIÓN NACIONAL DEL GANADO BOVINO**

La producción del ganado bovino es una de las principales actividades económicas, la cual provee de materias primas de origen animal y alimentos, forma una de las principales actividades económicas del sector primario del país. La ganadería registra el número de cabezas por especie producidas en un momento determinado del año, para tener información de la producción con la que cuenta cada entidad para el periodo de producción que está por iniciar. La

producción pecuaria del país depende tanto de la población ganadera nacional como de los parámetros productivos y reproductivos de las unidades de producción. La producción de ganado bovino se reporta en número de cabezas, excepto en el caso de abejas dónde se registra el número de colmenas (SIAP, 2019).

**Tabla 1.** Población de ganado bovino millones de cabeza.

Estado	Producción (ton)	Precio (pesos por kg)	Valor de la producción (miles de pesos)	Animales sacrificados (cabezas)	Peso (kg)
Veracruz	264,030.916	64.81	17,111,711.096	3.91	242.706
Jalisco	239,854.210	74.57	17,886,519.926	2.53	266.181
Chiapas	106,050.688	51.73	5,485,863.191	2.39	227.644
Michoacán	94,852.100	65.67	6,228,661.410	1.67	236.900
Oaxaca	62,378.894	71.34	4,450,092.386	1.58	199.473
Sonora	73,930.813	77.85	5,755,645.698	1.52	235.297
Sinaloa	107,296.262	62.74	6,731,343.491	1.49	265.872
Tabasco	72,543.091	70.62	5,122,796.883	1.43	235.908
Tamaulipas	43,399.876	78.45	3,404,618.116	1.33	260.059
Durango	105,193.911	63.30	6,658,791.111	1.16	260.248
Chihuahua	85,405.166	85.52	7,304,227.099	1.27	234.516
Guerreros	42,106.443	66.12	2,784,192.448	1.13	193.677

FUENTE: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2019.

### 2.3. FISIOLÓGÍA DIGESTIVA DE LOS RUMIANTES.

El ganado bovino se caracteriza por su habilidad de alimentarse de pastos, ramas y forrajes, ya que estos pueden degradar los hidratos de carbono estructurales, como celulosa, hemicelulosa y pectina, muy poco digestibles para especies que no son rumiantes o mono gástricos. A partir de esta diferencia fundamental, la fisiología digestiva del ganado bovino adquiere características particulares, debido a que la degradación del alimento se realiza, principalmente,

por digestión fermentativa, y no por la acción de enzimas digestivas, y los procesos fermentativos tienen lugar por diferentes tipos de microorganismos a los que la rumiante aloja en sus divertículos estomacales (Gutiérrez, 2015).

## **2.4. LA DIGESTIÓN FERMENTATIVA.**

La fermentación ruminal es la actividad metabólica de los microorganismos (MO) presentes en el rumen. Tiene aspectos que son diferentes a la digestión glandular propia de los animales monogástricos. La digestión en la mayoría de los mamíferos ocurre en el estómago y el intestino delgado por enzimas producidas por el animal mismo. Esto se denomina 'digestión autoenzimática'. En el ganado bovino, la degradación de los sustratos moleculares por la acción de bacterias y otros MO se realiza por una hidrólisis enzimática igual que en la digestión glandular; la diferencia es que las enzimas digestivas en la fermentación provienen de origen microbiano, por lo que se le denomina 'digestión aloenzimática'. La digestión fermentativa es más lenta y los sustratos son alterados en mayor grado que en la digestión glandular. Además, la fermentación se produce en condiciones anaeróbicas. La digestión aloenzimática puede ocurrir en solo dos sitios del tracto gastrointestinal. Estos sitios son el ciego y/o colon por un lado y por otro lado en el retículo y rumen. En el primer caso hablamos de fermentación cecocólica (o postgástrica) y en el segundo caso de fermentación pregástrica, la cual corresponde a los rumiantes (Van Lier, 2008).

Los microorganismos del rumen de los rumiantes forman complejos sistemas micro ecológicos compuestos principalmente por bacterias, protozoos, hongos, arqueas y una pequeña cantidad de fagos; la interacción de estos microorganismos degrada eficazmente las lignocelulosas. Los microorganismos del rumen son numerosos y las especies son complejas y abundantes. El volumen de estos microorganismos representa el 3.6% del líquido ruminal total y su número es 10 veces mayor que el número total de células de los rumiantes (Liang et al., 2020).

## **2.5. APARATO DIGESTIVO DE LOS RUMIANTES**

El primer segmento del aparato digestivo se encuentra la boca, donde se encuentran los dientes y la lengua. Los rumiantes carecen de los incisivos superiores. En cambio, tienen una almohadilla dental la cual es rígida, contra la que muerden. Los incisivos inferiores se encuentran en forma no rígida de modo de no lastimar la almohadilla dental. Los incisivos sujetan el alimento contra el rodete superior y el animal corta el bocado mediante un movimiento de cabeza. Este bocado es ligeramente masticado, mientras que el animal sigue comiendo. Cuando este ha llegado a varias mordidas forma un bolo, hasta que este es deglutido. Por otra parte, en ovinos el volumen del rumen es de alrededor de 5.3 L o 13% de su peso vivo, en cambio en bovinos el volumen es de cerca de 48 L o 15-21% del peso vivo. Se ha encontrado que contenidos ruminales de 4 a 6 kg en ovejas y de 30 a 60 kg en las vacas, modificándose con la ración y la velocidad a través del aparato gastrointestinal (Gonzalo, 2017).

### **2.5.1. DESARROLLO DEL APARATO DIGESTIVO**

En la fase de la formación gastrointestinal del endodermo y mesodermo se encuentran las células de la cresta neural que se introducen en el intestino dando origen al sistema nervioso entérico y la formación del intestino anterior, medio y posterior (Aguilera, 2011). Este desarrollo se basa en un proceso: la gastrulación, la formación del intestino primitivo en el endodermo y en el mesodermo lateral la aposición de la hoja esplácnica. Se derivan de la hoja esplácnica del mesodermo el peritoneo visceral de la pared del tubo, el tejido muscular y el tejido conectivo (Reis, 2012). Al inicio en el desarrollo del intestino anterior se observa el revestimiento ectodérmico para la formación de la membrana bucofaríngea, en el intestino posterior con el ectodermo forma la membrana cloacal que originará luego el alantoides (González, 2017).

## **2.6. ESÓFAGO**

Se forma en el primer segmento del intestino anterior, se encuentra en el ensanchamiento donde inicia el estómago y el divertículo respiratorio. Al inicio es corto el esófago y luego se alarga por la formación del cuello y al descender a los pulmones y el corazón (Ramírez, 2012). El lumen del esófago por un tiempo está tapado por las células del epitelio, pero en el período fetal se produce la

recanalización. La mucosa tiene un musculo longitudinal externo, glándulas tubulares con una secreción mucosa y una capa muscular estriada en los arcos braquiales, la musculatura lisa tiene una mesénquima en la pleura y en la desembocadura del estómago (Tarazona, 2012).

## **2.7. RUMEN Y RETÍCULO**

El estómago de los rumiantes está conformado por cuatro compartimientos, rumen, retículo, omaso y abomaso. El órgano más importante en la digestión es el rumen, ya que de este depende en gran parte, la fermentación se produce ahí para que los alimentos puedan ser digeridos por el rumiante. El retículo y el omaso también tienen funciones mecánicas en la digestión, mientras que el abomaso o estómago glandular, realiza una parte importante de la digestión enzimática (Carrasco-García, 2016) El metabolismo está relacionado con las funciones del ecosistema del rumen es generalmente consistente; sin embargo, las especies y la identidad taxonómica pueden variar entre estudios. Las razones de estas inconsistencias pueden deberse tanto a razones biológicas como técnicas. Por tanto, la taxonomía por sí sola no puede ser utilizada para fines de interpretar el estado de un microbioma dado y su conexión con los atributos del anfitrión. En consecuencia, este concepto erróneo exige un cambio conceptual que debería evitar la interpretación taxonómica asociada con estos estados comunitarios mientras se enfoca solo en las funciones. Por otra parte, en el rumen existen cascadas metabólicas las cuales son llevadas a cabo por la comunidad microbiana de manera compleja y coordinada, por lo que existen sucesivas redes tróficas de alimentación cruzada entre diferentes microorganismos ruminales. Estas cascadas suministran metabolitos básicos al animal anfitrión. De hecho, la producción microbiana de ácidos grasos de cadena larga y corta sirve hasta el 70% de los animales, debido a sus necesidades energéticas (Moraïs & Mizrahi, 2019).

## **2.8. MICROORGANISMOS DEL RUMEN**

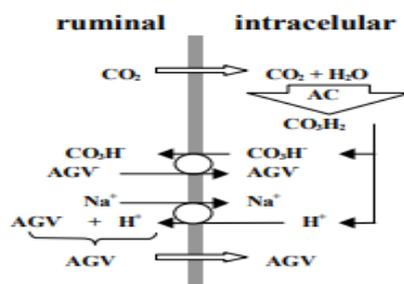
Gran parte de los microorganismos que se localizan en el retículo y rumen son estrictamente anaerobios, aunque existen algunos facultativos. Estos microorganismos son principalmente bacterias, protozoarios, y hongos del tipo de las levaduras. Aparecen ubicados en tres sitios diferentes en el rumen: Adheridos a la pared (flora epimural), Asociados a partículas alimenticias (SAB:

solid adherent bacteria), Libres, flotando en el líquido ruminal. Las bacterias se adhieren a la pared hidrolizando la urea y consumiendo el poco oxígeno que pueda llegar con el alimento ingerido o que difunde a través de la pared del rumen; al resto de los microorganismos el oxígeno les resulta tóxico. Las bacterias asociadas a partículas interactúan con sustratos no solubles, hidrófobos (bacterias celulolíticas y hemicelulolíticas) mientras que las que flotan en el líquido ruminal atacan sustratos solubles, hidrófilos. La biomasa que representa la cantidad de bacterias ruminales ( $10^{10}$ - $10^{11}$  células/mL de contenido ruminal) es parecida a la de protozoarios (50 - 50%) pero ya que el tamaño de los protozoarios es en mayor escala al de las bacterias, su número es menor que el de éstas ( $10^5$  - $10^6$  células/mL de contenido ruminal). Las bacterias se clasifican principalmente según el sustrato que utilizan o según los productos finales de la fermentación que realizan; de este modo tenemos bacterias celulolíticas, las cuales se encuentran principalmente en dietas con alto contenido en forraje, bacterias hemicelulolíticas y pectinolíticas. Las bacterias amilolíticas se encuentran en el rumen con el consumo de dietas con alto contenido de almidón. Las bacterias que usan ácidos intermedios realizan la fermentación secundaria de los productos finales de otras bacterias. Entre estos ácidos se encuentra el lactato, succinato y metanoato. El lactato puede ser fermentado hasta acetato, propionato o ácidos grasos de cadena más larga, el succinato se convierte en propionato y  $\text{CO}_2$  y el metanoato es usado como precursor para la producción de metano. Las bacterias proteolíticas poseen proteinasas y muchas de ellas tienen también exopeptidasas para una posterior degradación de oligopéptidos hasta aminoácidos y péptidos más pequeños. Las bacterias productoras de amoníaco lo obtienen mediante la eliminación de aminoácidos. El amoníaco se puede también se obtiene de la hidrólisis de la urea y en este proceso interactúan bacterias ureolíticas. Las bacterias lipolíticas hidrolizan principalmente triglicéridos y fosfolípidos dando glicerina y ácidos grasos. Las bacterias productoras de metano están muy asociadas a la fermentación de forraje y sobreviven en condiciones ruminales similares a las en que sobreviven las bacterias celulolíticas. Estos dos tipos de bacterias se inhiben con pH bajo (6.5 o menos) (Van Lier, 2008).

## **2.9. EL pH RUMINAL DEBE REGULARSE PARA EFECTIVIZAR LA DEGRADACIÓN RUMINAL DEL ALIMENTO.**

La acidosis ruminal subaguda (ARSA) se distingue principalmente por el decaimiento del pH, pero hasta ahora no se han establecido indicadores universales del pH del rumen ya que existe una gran variabilidad en los animales y en los métodos de medición del pH. El pH del rumen es uno de los parámetros más monitoreado al hacer el diagnóstico de ARSA. Históricamente, dependiendo de la gravedad de la ARSA, se han propuesto umbrales de pH promedio diario de 5.50 a 6.25 (Villot et al., 2017). Por otra parte, el pH del rumen varía entre 5.8 y 7.0 y surge de la propia fermentación. Por un lado, tenemos la producción del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) como base, la cual está relacionada a la fermentación proteica, como se observa más adelante, mientras que, por otra parte, se encuentra la producción de ácidos como los ácidos grasos volátiles (AGV), resultantes de la fermentación de carbohidratos. El balance entre las cantidades de ácidos y bases producidas, la velocidad con que ocurre esa producción, y la eficiencia de absorción de estos, forman la base del pH del rumen. Sobre esto operan los mecanismos fisiológicos los cuales se encargan de regular el pH, tendiendo a que no se excedan los límites fisiológicos. La dieta afecta el pH ruminal por diferentes vías. Los alimentos no inducen todos por igual a la rumia. La forma física de los alimentos es importante para inducir una adecuada rumia. El forraje tosco (fibroso) estimula mucho a la rumia mientras que los concentrados prácticamente no lo hacen. Durante el proceso de digestión se secreta gran cantidad de saliva que llega al rumen lo cual llega a la deglución del bolo alimenticio o de la rumia. La saliva contiene bicarbonato y fosfato que le dan un pH alcalino a la saliva (8.2 a 8.4) y que en el rumen actúan como tampón frente a la producción de ácidos. Cuando el rumiante consume concentrados la rumia

disminuye y por lo tanto, disminuye también la producción de saliva. Esto hace descender el pH ruminal (Van Lier, 2008).



**Figura 1.** Mecanismos de absorción de AGV en rumen (Relling, 2003).

La absorción ruminal de AGV por el medio celular es insignificante, y esta depende principalmente de la vía transcelular, introduciendo a la célula por dos diferentes mecanismos. Uno de estos mecanismos es la difusión simple, mecanismo electro neutro que no utiliza transportador, pero requiere que los AGV se encuentren en su forma no disociada y por lo tanto liposoluble. En su forma disociada el AGV posee carga eléctrica negativa, esto produce la atracción del extremo positivo de las moléculas de agua, que se comportan como un dipolo, creándose una capa de hidratación alrededor del AGV que le quita liposolubilidad y aumenta su diámetro, impidiendo así que pueda atravesar la membrana celular. A pesar de ser evidente que los AGV se absorben en parte en su forma no disociada, al pH normal del rumen este proceso es difícil de explicar debido al concepto de pK. El pK indica el valor de pH en el cual un compuesto está 50% disociado y 50% no disociado (Relling, 2003).

## 2.10. METABOLISMO RUMINAL DE LOS HIDRATOS DE CARBONO.

Los carbohidratos son unas de las principales fuentes de energía, siendo estos los precursores para la síntesis de grasa y lactosa. La fibra uno de los principales carbohidratos para los rumiantes ya que este es utilizado por los microorganismos para obtener energía para su crecimiento, el cual es generando a través de productos de desecho, esta energía se encuentra principalmente

disponible para el animal en la forma de AGV. La fibra es un alimento el cual tiene un mayor volumen que, por sus características químicas, tiene un tiempo de retención ruminal elevado, donde comienza la fermentación de la celulosa y la hemicelulosa. A medida que la planta envejece, el contenido de lignina en la fibra aumenta y la extensión de la digestión ruminal de la celulosa y hemicelulosa decrece. Como se informó anteriormente, la fibra larga o efectiva proveniente del forraje es fundamental para la estimulación de la rumia y la producción de saliva. La rumia es la encargada de la disminución del tamaño de partículas ruminales, ya que esta aumenta los niveles de fermentación de la fibra, la cual activa los movimientos ruminales y el flujo de saliva al rumen. Las dietas que carecen de fibra efectiva resultan generalmente en una disminución en la concentración en grasa butirosa de la leche, pudiendo generar problemas digestivos como la acidosis, desplazamiento de abomaso, entre otros (Santini, 2014).

Otras opciones de hidratos de carbono disponible en la alimentación de los rumiantes son los denominados no estructurales, como los solubles y el almidón. Estos son rápidamente, y en muchos casos completamente, fermentados a nivel ruminal. La provisión de hidratos de carbono no estructurales aumenta la densidad energética de la dieta, lo cual en líneas generales mejora el consumo de energía y es determinante de la producción de proteína bacteriana ruminal. Sin embargo, los consumos elevados de hidratos de carbono no estructurales disminuyen el tiempo de rumia afectando la digestibilidad de la fibra por una disminución del pH ruminal. Por lo comentando, el balance entre los tipos de carbohidratos suministrados es esencial en la alimentación para una producción eficiente (Crampton, 2014).

## **2.11. METABOLISMO RUMINAL DE LOS COMPUESTOS NITROGENADOS**

El metabolismo de las proteínas tiene características únicas en los rumiantes en comparación con los no rumiantes. A nivel intestinal la absorción de las proteínas es similar en rumiantes y en no rumiantes. Las proteínas y los péptidos son degradados hasta llegar a oligopéptidos por la acción de las enzimas proteolíticas pancreáticas (tripsina, quimotripsina y carboxipeptidasa), posteriormente estos oligopéptidos son degradados por las oligopeptidasas de la membrana apical de los enterocitos donde se liberan aminoácidos di y

tripéptidos y finalmente estos son absorbidos. Sin embargo, a diferencia de los monogástricos, la proteína que llega al intestino del rumiante es diferente de la ingerida con la dieta, esto se debe principalmente a los microorganismos ruminales ya que estos degradan aproximadamente la mitad de la proteína. Lo realizan mediante proteasas de membrana que liberan las proteínas en péptidos y algunos aminoácidos libres, los que son absorbidos por el microorganismo. Se refiere a el tamaño de los péptidos al absorberse, ya que se pensaba que tenían más de 16 aminoácidos, pero investigaciones recientes reportan que solo se absorben aquellos con no más de 5 aminoácidos. Estas diferencias se deben a que resulta difícil determinar si ciertas peptidasas están en la membrana o ya incluidas en el soma microbiano. Una vez que los péptidos son incorporados al microorganismo estos son hidrolizados hasta aminoácidos, estos pueden ser utilizados para sintetizar proteína microbiana o bien, como ocurre con la mayor parte de ellos, son utilizados como una fuente energética. En este caso los microorganismos separan el grupo amino del aminoácido y lo liberan al medio ruminal como un producto de desecho, donde se emplea la cadena carbonada para obtener energía como si fuese un hidrato de carbono. Por otro lado, los grupos amino ( $-NH_2$ ) que se encuentran libres se convierten, por adiciones de  $H^+$  en el ambiente reductor del rumen, en amoníaco ( $NH_3$ ) y luego en amonio ( $NH_4^+$ ), por lo cual la concentración de este último sirve como un indicador de la actividad proteolítica en el rumen. Los protozoarios poseen mayor capacidad proteolítica que las bacterias y los hongos, pero debido a que se encuentran en menor cantidad son responsables solo del 10 al 20% de la actividad proteolítica ruminal, a la que los hongos contribuyen en un porcentaje todavía menor y son fundamentalmente las bacterias las que realizan la mayor parte de la degradación proteica a nivel ruminal (más del 50%) (Relling, 2003).

El rumen constituye una ventaja evolutiva importante porque permite al animal el consumo de alimentos fibrosos y de nitrógeno no proteico (NNP). Sin embargo, desde el punto de vista de la utilización de la proteína verdadera de la dieta, el sistema es ineficiente en vacas lecheras que consumen concentrados ricos en proteínas, la eficiencia de conversión del N del alimento en N en la leche oscila entre 18 y 32%. Sea en las formas moleculares proteicas como en las no proteicas, el N llega al rumen en pequeñas cantidades a través de la dieta y la

saliva, por medio de la pared ruminal. Los compuestos nitrogenados de la dieta incluyen proteínas de diversos pesos moleculares y estructura terciaria, péptidos, aminoácidos, amidas, sales de amonio, nitratos, nitritos, amoníaco y urea, existen numerosas revisiones acerca del metabolismo del N en el rumen. Todas coinciden en dividir el estudio del metabolismo del N en tres aspectos básicos: procesos catabólicos, procesos anabólicos y factores que influyen en el metabolismo ruminal del N (Crampton, 2014).

## **2.12. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DE BOVINOS**

El ganado bovino tiene una serie de necesidades nutricionales diarias las cuales son suplidas mediante su alimentación diaria, como por ejemplo el pasto, ciertos "matones", ramas de árboles y hojas secas, etc. Estos forrajes aportan escasos contenidos de nutrientes, ya que de estos depende el aparte de energía y minerales. Habitualmente la alimentación de nuestros animales no les aporta los nutrientes diarios para que ellos produzcan eficientemente, ya sea por la poca disponibilidad de comida en los campos de pastoreo, debido a que los pastos son de baja calidad o por ambas condiciones. Las necesidades nutricionales que más cuesta aplicar a los animales en producción que están únicamente pastoreando son, la energía y proteína. Cuando esta situación se presenta, es primordial mejorar la alimentación del animal, por lo que es importante que introducir en la alimentación los nutrientes que hacen falta en la dieta. Es por esta razón que se debe "balancear" la dieta de los animales utilizando fuentes energéticas, proteicas y minerales en las cantidades y proporciones mantengan al animal nutrido. El propósito de los alimentos balanceados es suministrar ese faltante de nutrimentos a través de materiales alimenticios de buena calidad para proveer cantidades adecuadas a aquellos animales que consideremos que lo requieren, para mejorar su dieta y brindarle los nutrimentos que necesitan. Algunos productores dicen que ellos tienen bancos forrajeros para ofrecerles productos para sus animales durante las épocas críticas. En el caso de los minerales, es importante recordar que de manera natural el ganado no obtiene cantidades suficientes como para una buena producción, por esta razón se recomienda darles mezclas de sales minerales para que los animales las consuman a voluntad. Por lo general los animales consumen los minerales en

las cantidades que ellos requieren cuando tienen a disposición y libre acceso las sales minerales (Barrantes, 2006).

### **2.13. REQUERIMIENTOS DE MANTENCIÓN**

Según García (2008) menciona que, los requerimientos de mantención son las necesidades de nutrientes que tienen como objetivo mantener el funcionamiento de los procesos vitales de manera normal independientemente de la función productiva del animal. Es decir, estos permiten mantener vivo al individuo y cumplir las funciones de respiración, circulación, mantención del tono muscular, estos funcionamientos demandan un desgaste de energía. Al hablar de desgaste energético (Obregón, 2015) relata el incremento de bocados durante el pastoreo es uno de los principales factores que desgasta hasta un 15% energía en el animal, ya que los animales realizan la rumia durante 7 horas y en comparación con el desgaste de energía al caminar menciona que no pasa del 5% de energía perdida.

### **2.14. REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN**

Cuando el ganado bovino logra cumplir con los requerimientos nutricionales para la mantención, la energía y todos los nutrientes consumidos son enfocados a la producción. El ganado al momento de absorber y digerir la energía de los alimentos se generan pérdidas de energía para el crecimiento y la producción de leche y carne en el animal, lo que se traduce a energía neta es menor que la energía ingerida (Lanuza, 2006). El ganado bovino puede consumir diversos tipos de alimentos ya sean de calidad o no como por ejemplo la paja, pero en las dietas de los bovinos lo que determina su efectividad es el aporte de energía de estos y la capacidad del animal para extraerla. La energía que contienen los alimentos se aloja en las proteínas, grasa y carbohidratos que este contenga y es esta la que determina los requerimientos nutricionales del animal aportando considerablemente a la condición corporal (Giménez, 2015).

### **2.15. FORMULACIÓN DE ALIMENTOS BALANCEADO**

Los alimentos balanceados para animales son los encargados de proveer los nutrientes necesarios requeridos por el animal ya que estos proporcionan nutrición, reparación, respuesta inmune y mantenimiento durante las temporadas sequias. Para la producción de alimentos balanceados se utilizan diferentes

materias primas de acuerdo con los requerimientos nutricionales, higiénicas y de calidad física. Todos estos requerimientos necesitan el conocimiento de diferentes propiedades de los ingredientes para optimizar el proceso con la finalidad de obtener un alimento que cumpla con los requerimientos y manteniendo su valor nutricional. De ahí que la acción concertada de la Ciencia Nutricional y la Ciencia y Tecnología de Alimentos, sea esencial para el progreso de la producción animal (Cruz et al., 2015). Por lo tanto, para la formulación de alimentos se deben de considerar lo siguiente:

**a) Genética del ganado**

Los genes y raza del ganado son importantes ya que indicarán la cantidad de nutrientes que requieren para poder tener una buena producción, ya que los animales de raza pura tienen una mayor producción de leche o carne, pero estas demandan un mayor gasto de nutrientes. Además de ser animales de gran tamaño y tener un metabolismo acelerado se tiene que balancear adecuadamente la ración con insumos de alto valor nutricional.

**b) Nivel de Producción**

Cuando se inicia la producción de leche en el ganado es un periodo que tiene una alta demanda de energía y nutrientes, cuando se llega a la etapa media es cuando existe un mayor requerimiento y por último se llega a la fase de termino de producción donde el requerimiento es menor.

En el primer periodo de alta producción la demanda de nutrientes es muy alta principalmente de energía, esta etapa es la más crítica porque ya que se incrementa el consumo de materia seca, por lo tanto, existe un gran riesgo de que se presenten trastornos metabólicos (hipocalcemia, cetosis, otros) así como la pérdida de condición corporal. En el segundo periodo de media producción ya se espera que la vaca pueda ingerir la cantidad de alimento para poder satisfacer todos sus requerimientos más los requerimientos de gestación e ir ya ganando reservas para la siguiente campaña, la mayoría de los alimentos procesados que se incorporan a las dietas de los animales son alimentos extruidos, los cuales pueden llegar a mantener el animal (Fernández, 2013).

## **2.16. FORMULACIÓN DE DIETA**

En la dieta propuesta se incorpora un 50 % de harina de maíz, la cual se agrega como materia seca del alimento, dado que la dieta de los rumiantes está basada aproximadamente entre 4 - 6 kilos diarios, la harina de residuos de piña se incorpora en un 25% ya que la información citada por (Fernández, 2013). establece que el consumo en exceso de esta podría reducir la producción de leche y la ganancia de peso en los animales, es por ello por lo que se incorpora un mayor porcentaje de materia seca, la harina de alfalfa puede añadir un 25% de proteína, los minerales establecidos, son los que ayudan a mantener el equilibrio electrolítico en la sangre y tejidos (Obregón, 2015).

## **2.17. PROCESOS DE ELABORACIÓN DE BALANCEADOS**

La producción de alimentos balanceados es un proceso científico, el cual es un proceso que depende de personas. La industrialización del proceso de elaboración es muy común actualmente, pero existen aún muchas plantas de alimentos balanceados que son encargadas por personas que formulan los alimentos de acuerdo con las necesidades del animal. Dado que cada proceso en la elaboración de alimentos balanceados para animales es la unificación o mezclado de muchos ingredientes, resultados deficientes pueden ocurrir si se le da mucho énfasis a una faceta del proceso, a pesar de tener una automatización completa. La formulación de costo mínimo es lo que cada nutricionista está realizando, para lograr la mejor rentabilidad de la productividad animal, pero esto no significa que el proceso y la maquinaria presente en una fábrica produzcan un adecuado alimento balanceado. Muchas veces la noción de costo mínimo no es la adecuada en el proceso, ya que se necesitan materias primas de calidad para elaborar alimentos de calidad que rindan en el mantenimiento del ganado (Marlon, 2018).

## **2.18. EXTRUSIÓN**

Hoy en día la extrusión es uno de los procesos más utilizados en la producción de alimentos, gracias a su amplio uso y bajo costo de producción, se ha convertido en una pieza clave en la tecnología de procesamiento más importante de la industria alimentaria. Esta tecnología permite desarrollar snacks extruidos de mayor aceptabilidad para la población infantil y adulta. El bajo valor nutricional

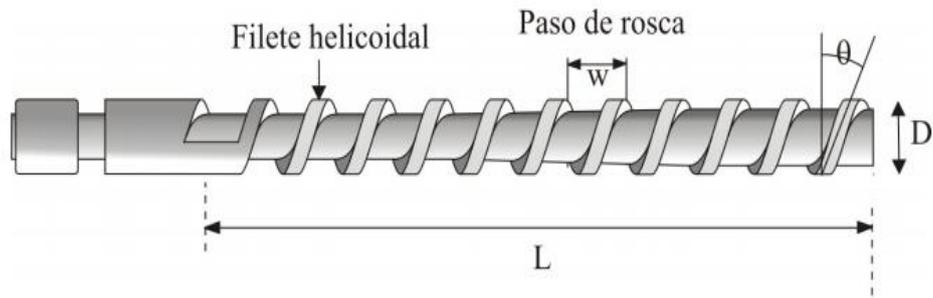
que presentan los productos a base de maíz ha provocado un incremento en la malnutrición de los consumidores, así como elaborar alimentos para consumo de animales (Manosalvas et al., 2019). Por otra parte, Fernández y Vera (2014), definen a la extrusión como un proceso que involucra el transporte de un material, bajo ciertas condiciones controladas, forzándolo a pasar por una boquilla donde se establece las dimensiones del extrudido y con un caudal masivo pre-establecido, durante este transporte se produce la cocción parcial o total de los componentes de la mezcla. El objetivo de la extrusión es elaborar nuevos alimentos de gran variedad respecto a forma, textura, color y sabor que compongan la dieta diaria, a partir de ingredientes sencillos (Manosalvas et al., 2019).

La extrusión de alimentos se desarrolla bajo diferentes condiciones como son: mezclado, calentado y cizalla, mediante un tornillo sin fin el cual empuja la mezcla para que salga a través de una boquilla de dada geometría y diámetro, como muestra la Figura 2, este proceso sirve para dar forma o expandir los ingredientes (Bongers, 2011).

## **2.19. PARTES DE UN EXTRUSOR**

### **2.19.1. EL TORNILLO DE EXTRUSIÓN**

El tornillo o husillo (Figura 2) está formado por un cilindro largo rodeado por un filete helicoidal. El tornillo es una pieza muy importante ya que este realiza las funciones más importantes como transportar, calentar, fundir y mezclar el material. El diseño del tornillo es muy importante ya que de él dependen en gran medida la estabilidad del proceso y la calidad del producto que se obtiene. Los parámetros más importantes en el diseño del tornillo son su longitud (L), diámetro (D), el ángulo del filete ( $\theta$ ) y el paso de rosca (w).

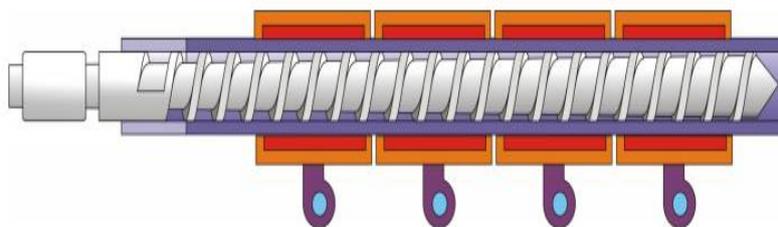


**Figura 2.** Tornillo de una extrusora (Beltrán y Marcilla, 2012).

El material se va presionando a medida que avanza por el tornillo, ya que es donde comienza la presión atmosférica en la tolva y aumentando hasta la salida por la boquilla. La sección de paso del tornillo no tiene una constancia, sino que es mayor la alimentación (mayor profundidad de canal). Normalmente el tornillo viene acompañado de ningún sistema de calentamiento o enfriamiento, aunque en algunos casos se emplean tornillos huecos por los que se hace circular un fluido refrigerante o calefactor (Beltrán y Marcilla, 2012).

### 2.19.2. CILINDRO

La cámara de extrusión alberga en su interior al tornillo. Donde se encuentra la superficie del cilindro esta es muy rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla que soportará el material y esto permita así que éste fluya a lo largo de la extrusor, y así también se evite la corrosión y el desgaste mecánico, la cámara se elabora principalmente de aceros muy resistentes y en algunos casos viene equipado con un revestimiento bimetálico que le confiere una elevada resistencia, en la mayoría de los casos superior a la del tornillo, ya que éste es mucho más fácil de reemplazar (Beltrán y Marcilla, 2012).



**Figura 3.** Sistema cilindro de calefacción-tornillos (Beltrán y Marcilla, 2012).

El cilindro generalmente tiene sistemas de transferencia de calor. El calentamiento se realiza mediante resistencias eléctricas que están localizadas en toda su longitud, y otras formas, aunque son menos usadas es, mediante radiación o encamisado con fluidos refrigerantes o calefactores. El cilindro por lo general se divide en varias zonas de calentamiento, donde tres tienen control independiente entre ellas, lo cual permite conseguir un gradiente de temperatura razonable desde la tolva hasta la boquilla. El cilindro tiene que estar a temperatura ambiente si como consecuencia de la generación interna de calor originada por la cizalla a la que se somete al plástico se rebasa la temperatura nominal del proceso (lo que ocurre normalmente). El enfriamiento en la menor parte de las ocasiones se hace con líquidos, ya que, aunque tengan una mayor capacidad para eliminar calor que el aire, aunque también se utiliza aire comprimido, la temperatura es más difícil de controlar. Normalmente se usan soplantes como las representadas en la (Figura 3). Se tiene que tomar cuenta que los sensores de control de temperatura quedan situados en el cilindro, por lo que la temperatura del material será siempre superior a la que indican los controles (Beltrán y Marcilla, 2012).

### **2.19.3. TOLVA DE ALIMENTACIÓN**

El cilindro está constituido principalmente por dos partes la primera se encuentra debajo de la tolva y se le llama tolva de alimentación. Esta suele estar conformada por un sistema de refrigeración para mantener el control de la temperatura de esta zona lo suficientemente baja para que las partículas de muestra no se adhieran a las paredes internas de la extrusora y se forme un tapón. La garganta de alimentación y la tolva están conectadas con a través de la boquilla de entrada o de alimentación. La boquilla suele tener un largo de 1.5 veces el diámetro del cilindro y una anchura de 0.7 veces el mismo, y esta suele estar desplazada del eje del tornillo para facilitar la caída del material a la máquina (Beltran, 2010).

### **2.19.4. TOLVA**

La tolva se denomina el contenedor donde introduce la muestra al extrusor. Tolva, garganta de alimentación y boquilla de entrada deben estar perfectamente ensambladas y diseñadas de manera se llegue a obtener un flujo constante de

material. Una opción para conseguir estas condiciones son tolvas de sección circular, las desventajas de estas que tienen costos elevados y son difíciles de conseguir que las de sección rectangular. Se diseñan con un volumen que permita albergar material para 2 h de trabajo (Beltran, 2010).

#### **2.19.5. PLATO ROMPEDOR Y FILTROS**

El plato rompedor está situado al final del cilindro. Es un disco delgado de metal con agujeros. La función principal del plato es servir ser un soporte para los filtros, donde la función de estos es separar los contaminantes para que no se mezclen con los extrudidos. Otra de las funciones de los filtros son el aumento del mezclado y homogenizan el fundido. Por lo general se encuentran delante del plato rompedor, primero se sitúan los de malla más ancha, lo cual reduce el tamaño de malla progresivamente. Al reverso se encuentra un último filtro también de malla ancha y finalmente el plato rompedor que soporta los filtros. Conforme la secuencia se ensucian las mallas es necesario remplazarlas para evitar la disminución excesiva de la presión y que disminuya la producción. Por ello, el diseño del plato debe ser tal que pueda ser reemplazado con facilidad (Beltran, 2010).

#### **2.19.6. CABEZAL Y BOQUILLA**

El cabezal se encuentra al final del cilindro, este se encuentra sujetando la boquilla y el plato rompedor. Comúnmente esta atornillado al cilindro. El perfil interno del cabezal aumenta lo más posible el flujo del material hacia la boquilla. Donde se encuentra un sistema cabezal-boquilla de forma anular. El material fluye del cilindro a la boquilla a través del torpedo, situado en el cabezal. La sección transversal de los soportes del torpedo se diseña para proporcionar el flujo de material a velocidad constante. Una de las funciones de la boquilla es la de moldear el plástico. Las boquillas generalmente se clasifican por la forma del producto, teniendo así boquillas anulares (algunos ejemplos, para la fabricación de tuberías o recubrimientos de materiales cilíndricos), boquillas planas (con las que se obtienen planchas y láminas), boquillas circulares (con las que se obtienen fibras y productos de forma cilíndrica), entre otros (Beltran, 2010).

## **2.20. PARÁMETROS DURANTE EL PROCESO DE EXTRUSIÓN**

La extrusión es un proceso el cual requiere de la aplicación de calor durante un tiempo determinado para llegar al final del proceso, comúnmente, la gelatinización del almidón. El calor se puede incorporar al proceso por diferentes mecanismos de transferencia de calor, muchos de los procesos de cocción pueden se caracterizan por incluir los mecanismos de transferencia utilizados habitualmente. Generalmente la humedad interactúa en función de las condiciones de operación del proceso de extrusión. Se necesitan altas viscosidades para un menor gasto de energía mecánica; a viscosidades menores, la conducción y convección son aún más efectivas, por lo que el contenido de humedad es un factor importante, ya que esta tiene un efecto de enfriamiento, lo cual contribuye a la gelatinización, y la fuerza motriz detrás de la expansión. Existen dos factores más importantes en la cocción, después de la humedad y la velocidad de corte, son el tiempo de retención y la temperatura. Altas temperaturas, requieren un menor tiempo de retención, por lo que el proceso de cocción se puede caracterizar por su aplicación de temperatura, tiempo y porcentaje de humedad. La velocidad de corte particularmente aumenta en función de la temperatura más alta. Cuando se desea extrudir en tiempos muy cortos a temperaturas muy altas, la velocidad de corte es la opción más rápida de aumentar la temperatura. Los productos obtenidos reflejan las condiciones a las que han sido sometidos. Durante un tiempo breve, alta velocidad de corte, y temperaturas elevadas de procesamiento, un tornillo corto, con alta velocidad y álabes de poca altura van a crear el ambiente correcto. A la inversa, para cocción más suave y larga, un tornillo de menor velocidad, aletas más profundas y largas son necesarias (Araiza et al., 2011).

### **2.20.1. TEMPERATURA**

Para llegar a obtener extrudidos con altos índices de expansión se necesitan altas temperaturas, por lo regular esta temperatura se encuentra entre 140 - 170 °C, debido a las fuerzas de cizalla (LLopart, 2011).

### **2.20.2. PRESIÓN**

Esta variable está profundamente relacionado a la velocidad de giro del tornillo, al aumentar la velocidad, se incrementará la presión y por ende la temperatura

en el interior del extrusor. Como resultado el material extruido tiene mayor expansión, poros más pequeños y textura blanda (Aguirre & Calderón, 2017).

### **2.20.3. TIEMPO**

Para Torres y Pérez (2006), la regla imprescindible en productos extruidos es un corto tiempo de residencia. En extrusores de tambores cortos indica que el tiempo es de solo unos pocos segundos, y aun cuando los tambores sean largos, el tiempo debe ser limitado. Señala que aproximadamente el tiempo oscila entre los 15 a 90 s a través del cilindro.

### **2.20.4. VELOCIDAD DE TORNILLO**

La velocidad del tornillo tiene un efecto en el tiempo de residencia y al gradiente de velocidad impuesto al material que es transportado a lo largo del tornillo (LLopart, 2011). Para alcanzar una elevada temperatura, la velocidad de tornillo debe ser alta, aproximadamente 300 rpm además de que los canales de sinfín o elementos de mezclado deben ser poco profundos (Torres y Pérez, 2006).

## **2.21. VARIABLES DE OPERACIÓN**

El sistema de la cámara de extrusión depende de las interacciones del tornillo-boquilla:

- Dimensiones del tornillo;  $D, L, h, \theta$
- Tipo de polímero;  $\eta$
- Condiciones del proceso;  $N, T$
- Restricción impuesta por la boquilla;  $\Delta P$

Las dimensiones del tornillo y longitud del tornillo no afectan directamente al flujo de arrastre, pero este si tiene un efecto en el flujo de presión. Si la zona se comienza a obstruir mediante material esto aumenta la presión en el tornillo. El aumento de la longitud del tornillo se observa en la representación de  $Q$  frente a  $\Delta P$  como una disminución en la pendiente de la línea operativas del tornillo

Efecto de la viscosidad del polímero sugiere que un incremento en la viscosidad supone una disminución de la pendiente de las rectas. Sin embargo, el aumento de la viscosidad se traduce a un mayor consumo de energía, por lo que resulta

interesante utilizar materiales de baja viscosidad. La disminución en la viscosidad puede lograrse de varias formas:

- Aumentando la temperatura de la boquilla o el perfil de temperatura a lo largo del cilindro
- Utilizando un material de menor peso molecular
- Usando aditivos tales como lubricantes internos o plastificantes Cualquiera de estas soluciones puede presentar inconvenientes, como un aumento de los precios, incremento del tiempo de enfriamiento, variación de las propiedades mecánicas del producto, entre otras.

Efecto de las condiciones de operación al aumentar el número de revoluciones del tornillo,  $N$ , aumenta el flujo de arrastre, pero de acuerdo con el flujo de retroceso no se ve afectado, por lo que se obtiene un mayor caudal. Así, para un mismo tornillo, al aumentar el número de vueltas se debería obtener un haz de rectas operativas paralelas con mayor ordenada en el origen, lo que implica que, a mayor  $N$ , mayor caudal, independientemente de  $\Delta P$ . Sin embargo, la experiencia demuestra que al aumentar el número de vueltas en realidad no se obtienen rectas paralelas, pues el polímero fundido es pseudoplástico, como vimos en temas anteriores. Así, al aumentar el número de vueltas, aumenta la cizalla sobre el material, por lo que disminuye su viscosidad, y en consecuencia aumenta el término  $QP$ , aumentando también la pendiente de las líneas operativas del tornillo (Beltrán Rico & Marcilla-Gomis, 2012)

## **2.22. APLICACIONES DE LA EXTRUSIÓN**

El proceso de extrusión ofrece variedad de ventajas sobre un amplio rango de aplicaciones; las cuales se dividen en tres áreas: alimentos para consumo humano, consumo animal y uso industrial (Araiza et al., 2011).

## **2.23. ALIMENTOS PARA CONSUMO ANIMAL**

Para satisfacer los requerimientos de energía de los animales, es necesario conocer las necesidades energéticas que tienen las diferentes funciones metabólicas, el contenido de energía en los tejidos y la leche, y la eficiencia con la que se utiliza la energía. Igualmente se requiere conocer como estas necesidades se ven afectadas por el consumo de energía debido al ambiente y

actividades físicas, como el frío o calor, y además de todo lo anterior, es también de gran relevancia determinar la disponibilidad energética de los ingredientes de la ración que consumen los animales (Elizondo-Salazar, 2020).

## **2.24. TEXTURA**

La textura de los extrudidos es la característica física (propiedad) más importante, y principalmente esta se debe a la materia prima usada para la extrusión. La composición de los ingredientes, el contenido de humedad y temperatura son los factores principales que afectan la textura del extrudido. Esta característica (propiedad) es importante para diferenciar el efecto de parámetros de proceso. Las propiedades de textura en productos alimenticios son medidas con instrumentos de medición de deformación de fuerza como las Pruebas de Compresión Instron y equipos como Analizador de Textura. La dureza está definida como la fuerza requerida para comprimir una sustancia entre los dientes molares (en el caso de alimentos sólidos) o entre la lengua y el paladar (en el caso de semi alimentos sólidos). La muestra es comprimida hasta deformarla dada a la penetración, la cual puede ser suave, firme o difícil. Sobre todo, esta prueba es requerida principalmente para productos como snacks, donde crujiente es un atributo deseable. Una evaluación de textura completa incluye el Análisis de Perfil Textural (TPA), que miden; elasticidad, gomosa, Fracturabilidad, coherencia, dureza y las propiedades de productos de alimentación (Patil et al., 2005). Algunos productos o residuos agroindustriales ayudan a incorporar un mayor contenido de fibra y materia seca, donde se mejora la textura del producto y su valor matronal, los rastrojos de piña pueden ser suministrados a los rumiantes tanto frescos como ensilados, debido a que presentan niveles intermedios de nutrimentos respecto a los pastos frescos y a los ensilados (Araiza et al., 2011).

## **2.25. PIÑA (*Ananas comosus L.*)**

La piña, (*Ananas comosus L.*) es una de las frutas tropicales de mayor producción en el mundo después del banano y los cítricos, el fruto de la piña está compuesto por un racimo de frutículos individuales, que son como la extensión del tallo por la forma en que se aloja sobre un pedúnculo de 100 a 150 mm de largo. El peso de los frutos tiene un aproximado de 8 kg, pero para el comercio es deseable una piña de mediano tamaño unos 4 kg. La piña se produce principalmente en

zonas tropicales y subtropicales con una producción mundial de 25.4 millones de toneladas (Dussán-Sarria et al., 2020). De acuerdo con las estadísticas, México figura entre las primeras diez naciones en cuanto a volumen de producción de piña (FAOSTAT, 2018; SAGARPA, 2018).

## **2.26. PRODUCCIÓN DE PIÑA**

La piña (*Ananas comosus*) se encuentra en el tercer lugar de frutos importantes económicamente a nivel mundial, con una producción de 24,785,762 ton (FAOSTAT, 2018). La industrialización de la piña se obtiene aproximadamente un 75% del peso del fruto como desechos, los cuales son una fuente valiosa de fibra, azúcares solubles, proteína, ácido ascórbico, vitaminas, minerales, agua y de compuestos bioactivos como la bromelina de múltiples aplicaciones. Los residuos de la piña pueden ser implementados en los procesos fermentativos del rumen; sin embargo, muchas veces son tirados causando serios problemas de contaminación (Ramírez-Ramírez et al., 2020).

La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural reportó que en México se producen un millón 209 mil toneladas de piña la cual es considerada la reina de las frutas tropicales, estos datos arrojan un crecimiento de 16.2% en comparación con el año anterior. De acuerdo con cifras del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) la piña es el fruto que más creció en el campo mexicano el año pasado. Seguido de la frambuesa con un aumento de 13.8% con 147 mil toneladas, y el durazno que aumentó 9.1%, con 173 mil toneladas. La piña es una fruta tropical perenne de nombre científico *Ananas comosus* L. Forma parte del grupo de las monocotiledóneas y pertenece a la familia “Bromeliaceae”. En muchas regiones se conoce como “ananá”. La producción de esta fruta ha ido en aumento en el país. En 2017 se alcanzaron 945 mil toneladas; en 2018 sumó un millón de toneladas, y 2019 después alcanzó un millón 041 mil 161 toneladas, señala el SIAP. Este fruto se ha cultivado durante cientos de años. Es originaria de Sudamérica, probablemente de la región entre el sur de Brasil y Paraguay, donde se cultivaba como recurso alimenticio y para preparar bebidas conocidas como “chicha” y “guarapo”. Actualmente, México se encuentra en el noveno productor mundial de piña. El área de piña en la superficie mexicana representa el 1.4 de producción a nivel mundial. La piña tiene una producción estable durante todo el año, sin embargo,

entre junio y agosto se produce el 33.7% del total nacional, alrededor de 350 mil toneladas. En 2019, la producción de piña se realizó en 14 estados, sin embargo, la mayor producción nacional se destaca en Veracruz, seguido de Oaxaca, Tabasco, Nayarit y Jalisco. Las principales exportaciones de piña se dirigen a Estados Unidos, con un valor de alrededor de 30 millones 602 mil dólares. Otros mercados que compran el fruto mexicano son Corea del Sur, Rusia, Canadá, Francia, Japón, Italia, Panamá, España, Emiratos Árabes Unidos y Países Bajos. Cabe resaltar que, en 2020, las hortalizas y los frutos fueron las mayores exportaciones que México realizó, donde se concentraron más de 61 por ciento del total que se vende al mundo. En México, el consumo anual por cada persona de piña es de 7.7 kilogramos. A nivel nacional tiene una producción de frutos de 4.4%. De la piña se pueden elaborar jugos, concentrados, jaleas y preparaciones enlatadas. A la cascara se le pueden dar ciertos usos como elaboración de tepache o para alimentar animales de corral. Se puede comer piña fresca en cualquier época del año y disfrutar de sus beneficios. Aporta minerales como el potasio, magnesio, calcio, hierro y sodio, también vitaminas A, C, y ácido fólico. La piña también ayuda a desintoxicar el cuerpo. (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022).

A nivel nacional, el estado de Oaxaca es el segundo productor de esta fruta con una producción que rebasa las 130 mil toneladas las cuales representan 13.8% de las más de 945 mil reportadas para el año 2020. En esta entidad, el municipio de Loma Bonita participa con el 73.2% de la producción estatal (Martínez-Castro et al., 2020).

## **2.27. FIBRAS NATURALES**

Las fibras naturales se obtienen principalmente de todas las partes vegetales, por ejemplo, de las raíces, tallos, hojas, semillas, etc.; en el caso de la piña puede ser de las hojas de la planta y de la cascara del fruto. Cada una tiene diferentes características y proporciones. El objetivo es mostrar la importancia de las fibras, justificar su extracción y prever de datos técnicos para el proceso de desfibrado mecánico y diseño de la máquina los residuos producidos por la industrialización de la piña contienen principalmente celulosa hemicelulosa y lignina; esta

composición les confiere propiedades y estructura para ser utilizados en composta y alimentación de rumiantes, textiles, en la manufactura de pulpa y papel, producción de combustibles alternativos, enzimas, entre otros (Avella 2014).

### **2.27.1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS HOJAS Y FIBRAS DE LA PIÑA**

Una vez que se ha cosechado la fruta de la piña, los restos de la planta que son el 80% de la masa total del cultivo, sirven de alimento al ganado de pastoreo o bien, es chapeado inmediatamente o al inicio del otro ciclo de cultivo. Estos residuos son las hojas fibrosas que pueden ser aprovechados de una manera más eficiente y rentable. Una planta joven presenta de 25 a 30 hojas, mismas que producen fibras en un 2 a 3% de su peso (hoja verde). Las dimensiones de estas hojas varían en un cierto rango (Avella 2014).

## **2.28. SUPLEMENTO ALIMENTICIO PARA BOVINOS**

Los suplementos alimenticios para los bovinos tienen como función complementar las carencias de nutrientes en su alimentación, mediante la implementación de suplementos ricos en energía, nitrógeno y minerales. Esto mediante implementos de materia prima con buena calidad y bajos costos. La piña es una de las frutas con mayor relevancia económica en el mundo, tiene una producción a nivel mundial, entre 20015 - 2018, fue de 25.4 millones de toneladas de fruta fresca, donde los principales países productores son, Filipinas, Brasil, Costa Rica, Tailandia y China, los cuales representan el 55% del total de la producción. Paralelo al crecimiento en área cultivada y a las ventas de este producto, se da un incremento en subproductos que se obtienen de este cultivo, como la planta entera, los desechos, las coronas, los tallos, las cáscaras, la pulpa y el corazón; son materias con alto contenido de fibra que puede ser implementado en la alimentación del ganado bovino.

El cultivo y la industrialización de la piña genera grandes cantidades de desechos los cuales pueden ser implementados en la alimentación de los rumiantes, de acuerdo con López (2008) por cada hectárea de piña cosechada se generan entre 200 y 250 toneladas de desechos (planta entera) a los cuales no se les da

un uso y presenta potencial para ser utilizado en la alimentación de rumiantes. También, el uso de las coronas del fruto como alternativa alimenticia para el ganado lechero está en crecimiento, estas equivalen entre el 9 y 11% del peso fresco del fruto (190 – 260 g) de acuerdo con la densidad de siembra y cultivar (Rebolledo et al., 2006). Las investigaciones de Gutiérrez et al. (2015), López et al. (2008) y Rodríguez (2007) en Costa Rica, demuestran que los subproductos del cultivo de la piña poseen una composición nutricional similar a forrajes empleados en sistemas ganaderos y que pueden ser conservados por medio de la técnica del ensilaje para su posterior utilización. De la misma manera, trabajos realizados en sistemas de producción en Brasil, recomiendan de forma favorable el uso de los subproductos de la piña en alimentación de animales rumiantes los resultados de la composición química de cada parte de la piña, se establece que las cantidades son medias de materia seca (MS), proteína cruda (PC), energía neta para lactancia (ENL), por esta razón no se puede adoptar como un forraje diario para el animal, es por esto que se debe complementar en alimentos balanceados altos en MS, PC, de no ser así no se le estarían dando los nutrientes necesarios al animal para su mantenimiento. Una manera de implementar los desechos de piña puede ser en fresco y ensilados, debido a que presentan niveles intermedios de nutrimentos respecto a los pastos frescos y a los ensilados (maíz, soya, pasto, asociaciones maíz + soya) utilizados en la alimentación de rumiantes en condiciones tropicales. Además, estos contienen mayor energía en comparación con los pastizales, pero comparables a los forrajes de zonas templadas, al adicionar fuentes de carbohidratos como la melaza y la pulpa de cítricos deshidratada se mejora el perfil energético del material (Avella 2014).

## **2.29. RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS PARA ANIMALES**

Los residuos agroindustriales se producen en el proceso de las frutas las cuales no tiene un uso (Rosas et al., 2016). El sector de la industria de la agricultura no es la excepción, generalmente se producen desechos los cuales son definidos, como materiales en estado sólido o líquido obtenidos a partir de la manufactura o industrialización de la materia prima, estos no son de mucha utilidad de acuerdo con el proceso que los generó, pero sí se pueden aprovechar o

transformar para obtener otro producto con valor económico, comercial o social. Cada subsector de la agroindustria genera residuos específicos. En su mayoría, estos presentan características óptimas para su aprovechamiento en otra cadena de producción o como alternativa de tratamiento o recuperación de algún medio contaminado (Vargas & Pérez, 2018).

Los altos precios de la materia prima, principalmente los cereales u otros componentes que se utilizan para la elaboración de concentrados o cualquier otro tipo de alimento, crea la necesidad de buscar materias primas con bajos costos y con altos contenido de energía para el animal. Muchos de los residuos agroindustriales tienen una composición química y física que los hace muy útiles en la elaboración de alimentos. Algunos han sido utilizados en la producción de alimentos para rumiantes, cerdos, aves y otras especies (Saval, 2012). Una excelente alternativa en países de primer mundo es la producción de ensilaje de buena calidad. Este método permite obtener buenos resultados en la producción de carne y leche, lo cual reduce los costos de producción y es un buen método para el engorde. Por otra parte, esta técnica no puede ser implementada por productores pequeños en países pocos desarrollados FAO (2018), en la alimentación del cerdo también se han implementado el uso de residuos agrícolas, como residuos de tomate, foliares del plátano y residuos de frutas cítricas. Por ejemplo, el follaje del boniato o batata se caracteriza por ser principalmente una fuente de proteína y vitaminas que ha sido usado para reemplazar un 10% de los piensos comerciales consumidos por cerdos destetados (6 a 12 kg) con resultados satisfactorios. Por otra parte, Martín (2009) reportó que subproductos de la producción de caña, residuos de cosecha, melazas, bagazo, mostos, forrajes, cabecilla, salvado, pastas proteicas, residuos de cervecería y residuos de hortalizas son utilizados principalmente para la alimentación animal. De igual forma, se menciona la relación de alimentos producidos a partir de las melazas y la destilación asociada a su fermentación. El alto contenido de azúcares de las melazas ayuda a la implementación como fuente de energía en el uso de la alimentación de rumiantes y monogástricos. Sin embargo, una desventaja es el poco contenido de nitrógeno, lo cual lleva a la implementación de subproductos de piña los cuales tienen altos contenidos de nitrógeno, que han sido utilizadas en la alimentación de diferentes especies.

Según Yepes et al. (2008) los residuos agroindustriales con alto valor de FDT o FDS (fibra dietaria total o soluble) pueden ser utilizados en la producción de sustancias alimenticias para consumo animal. Por ejemplo, los residuos de maracuyá tienen un valor de FDT de 66.9%, y los residuos de limón y naranja presentan un valor de FDS de 33 y 35% respectivamente. Además, estos también pueden ser implementados en la elaboración de alimentos para consumo humano. Los flavonoides, por ejemplo, sirven como suplemento alimenticio para animales y humanos. Por otra parte, en México utilizaron el bagazo de *Agave tequilana* W. var. Azul en raciones alimenticias para rumiantes. A este residuo le evaluaron sus características físicas, que dependen de los procesos de cocción y molienda efectuados en la fábrica de tequila de la cual provenga, y su composición química, que hace evidente la proporción mayoritaria de las fibras lignocelulósicas expresadas en un 77% en materia seca (celulosa, hemicelulosa y lignina). Lo anterior da como resultado que los desechos pueden ser utilizados para la alimentación de animales. No obstante, presenta un inconveniente referente a la baja digestibilidad por su alto contenido de lignina, que puede disminuirse mediante un tratamiento con hidróxido de calcio para hacer del bagazo un suplemento óptimo (Vargas et al., 2013).

### **2.30. RESIDUOS DE PIÑA (*Ananas comosus*).**

Paralelo al crecimiento en área cultivada y a las ventas de este producto, se da un incremento en subproductos que se obtienen de este cultivo, como la planta entera, los rastrojos (plantas sin raíces), las coronas, los tallos, las cáscaras, la pulpa y el corazón; materiales con alto potencial para su utilización (Tabla 2) en la alimentación de animales rumiantes (López et al., 2014). En la industria agroalimentaria los desechos de piña (pulpa y cáscara) han sido utilizados en la alimentación de rumiantes por parte de productores de leche y carne, con resultados satisfactorios en la producción de leche y condición corporal de los animales.

**Tabla 2.** Composición nutricional de la piña.

Parte de la planta	Composición nutricional (%)			
	MS	PB	FDN	FDA
Planta entera	25.2	7.6	60.8	34.7
Rastrojo	15.0	10.1	53.4	32.6
Corona	17.0	11.0	59.3	35.5
Tallo	30.2	3.7	46.2	20.7
Raíces	59.1	2.5	70.9	60.6
Cáscara y pulpa	29.5	8.2	63.9	34.3
Pulpa	51.9	5.9	53.2	23.7
Cáscara	26.6	6.9	54.8	20.8
Corazón	21.9	2.1	-	-
Estado del material				
Seco	78.9	6.2	64.5	29.8
Ensilado	15.7	10.0	57.1	34.6
Fresco	15.4	9.1	56.7	32.4

MS: Materia seca; PB: Proteína bruta; FDN: Fibra detergente neutro; FDA: Fibra detergente ácido. Fuente: López et al. (2014).

No obstante, dada la estacionalidad de la producción de piña y por consiguiente los desechos de esta fruta, la necesidad de buscar una alternativa sustentable para el uso de estos y disminuir su efecto contaminante, genera la posibilidad de utilizarlos en forma ensilada (Gutiérrez et al., 2003).

De acuerdo con López et al. (2014), la mayoría de los subproductos presentan valores entre 15 y 30% MS, donde las raíces muestran el menor contenido de humedad debido a un mayor contenido de fibra y minerales, este efecto de la raíz sobre el contenido de MS se evidencia al compararlo con los rastrojos (partes de la planta sin la raíz).

El contenido de proteína en la mayoría de los subproductos fue menor al 8%, donde el dato más bajo se obtuvo en el corazón de la fruta. Sin embargo, hubo subproductos que alcanzaron niveles de 10 y 11% de proteína cruda. El

contenido de PC mostrado, indica que no hay un adecuado aporte de este nutrimento cuando se incluyen este tipo de materiales en una dieta para animales, por lo que se deben complementar con alimentos altos en PC, de lo contrario se podría reducir la producción de leche y la ganancia de peso en los animales (Tabla 2).

### III. ANTECEDENTES

**Solanas et al. (2005)**, evaluaron el efecto de la extrusión y la adición de carbohidratos en la degradación del rumen y la digestibilidad intestinal de las semillas de legumbres crudas y la harina de soya extraída con disolvente. Los resultados mostraron, la extrusión no afectó a la composición química de los suplementos proteicos, excepto el contenido de contenido de fibra (CF) de los altramuces, que disminuyó del 17.9 al 13.8% y el de contenido de proteínas (CP), que aumentó del 30.2 al 33.4%, la interacción alimento-extrusión también fue significativa, debido a la mayor disminución de guisantes [45% de unidades] en comparación con WSB (Habas de soja enteras), altramuces y SBM (18-20% de unidades). la extrusión aumentó la digestibilidad intestinal de los residuos de incubación del rumen de las semillas de legumbres (30.5, 12.9, 12.1 y 12.8% de unidades en WSB, altramuces, guisantes y WSB-M (Habas de soja enteras, sin maíz añadido) respectivamente, también se observó la aparente disminución del contenido de CF de los altramuces después de la extrusión podría ser el resultado de una despolimerización parcial de los polisacáridos de la pared celular, haciéndolos más solubles en las soluciones diluidas de ácidos y álcalis durante la determinación. La extrusión redujo claramente el contenido de proteína ruminal de las tres semillas de legumbres crudas, El efecto fue más notorio en los guisantes, lo que podría estar relacionado con las reacciones de Maillard durante la extrusión, inducidas por su alto contenido de almidón, además se mostró que La extrusión habría hecho que una fracción de la proteína del alimento se degradara más lentamente por los microorganismos ruminales sin comprometer la digestibilidad intestinal.

**Gonzales et al. (2008)**, investigaron la factibilidad de producir un alimento para bovinos de engorda que contenga ingredientes no convencionales como es el deshecho de la industrialización de los cereales conocida como “kellogg’s”, evaluaron el valor nutritivo de los desechos de la industrialización de los cereales cuando se incluyen en raciones extrudidas para bovinos de engorda. Los resultados mostraron, el peso final del grupo control fue de 277.4 kg y el del

grupo experimental de 287.4 kg. La diferencia de 10 kg no resultó diferente estadísticamente probablemente por la variación que hubo entre los animales, también se observó que el costo por kilogramo aumentado resultó en un 12% menor con la dieta conteniendo los residuos industriales de los cereales, lo cual representa un buen ahorro para el productor por concepto de alimentación.

**Reyes-Jaquez et al. (2011)**, investigaron y evaluaron el efecto de la temperatura de extrusión y el contenido de humedad sobre las propiedades funcionales y la digestibilidad *in vitro* de un alimento balanceado para ganado bovino a base de harina de frijol, los resultados mostraron, que el mayor contenido de proteína se encontró en la harina de soya (55 g/100 g), seguido de harina de semilla de algodón (44 g/100 g), mientras que la harina de frijol y la harina de alfalfa presentaba el mismo contenido (19 g/100 g), El alto contenido de proteínas y energía permite un mejor equilibrio de ácidos grasos volátiles, la fracción de proteínas presenta una degradabilidad ruminal baja a media, lo que aumenta el flujo de proteínas del intestino delgado y mejora el equilibrio de energía y proteínas de los nutrientes absorbidos. El coeficiente de regresión de humedad positiva de las dos dietas indica que al aumentar la humedad del 18 al 22%, el índice de expansión aumentó, esto también se observó con los extruidos de frijol. Los extruidos con alto contenido de almidón, con mayor humedad, mayor índice de expansión se observó que el término lineal de la temperatura de extrusión no era significativo en ambos casos, mientras que, para el índice de absorción de agua, el contenido de humedad en su término lineal mostró un efecto significativo en todo el modelo en esta variable de respuesta. En el caso de índice de solubilidad en agua, se observó que el término cuadrático de la temperatura y su interacción con el contenido de humedad presentaban un efecto estadísticamente significativo ( $p < 0.05$ ).

**Elizondo et al. (2014)**, investigaron la composición nutricional de la cáscara de piña ensilada con urea y heno para su potencial uso en alimentación de novillas u otros rumiantes, los resultados mostraron que el pH obtenido en las muestras indica que la cáscara de piña en fresco con o sin la adición de aditivos (heno y/o urea) posee características

favorables para ser ensilada, debido a que el pH es menor al que se puede obtener del forraje fresco de maíz y al de los pastos tropicales, también se observó la concentración de proteína cruda de la cáscara sola es similar a la de la mayoría de pastos que se utilizan para corte y menores a los que presentan la mayoría de los pastos tropicales para pastoreo. El contenido de proteína de los materiales ensilados está influenciado por la inclusión de urea en la mezcla; lo que permite al ensilaje de cáscara de piña tener un gran potencial de uso como alternativa en la suplementación de rumiantes, el comportamiento de las fibras, permite obtener una mayor digestibilidad en de los ensilados con inclusión de urea, La cáscara de piña podría ser suministrada a novillas u otros rumiantes, tanto fresca como ensilada, debido a que presenta niveles intermedios de nutrientes, con respecto a los forrajes de uso común y utilizados en la alimentación bajo condiciones tropicales. Cuando la cáscara de piña se mezcla con urea y/o heno puede ser conservada exitosamente a pesar de su alto contenido de humedad, además de que la inclusión de la urea mejora los contenidos de proteína cruda, con los beneficios que esto conlleva.

## IV. JUSTIFICACIÓN

La alimentación es uno de los factores de mayor importancia para lograr expresar el potencial del ganado en las diferentes etapas de crecimiento o de producción en la que se encuentre. Por lo que, es de suma importancia la cantidad de nutrientes que pueden encontrarse en los diferentes tipos de alimentos que existen en el mercado, los cuales tiene una gran cantidad de hormonas entre otros aditivos que son eficaces para el desarrollo del animal pero con un alto impacto en la salud del animal y en los productos obtenidos del ganado bovino, en la zona se pueden encontrar materias primas para la elaboración de un alimento balanceado tal es caso de los desechos generados por las industrias procesadoras de piña, los cuales no tienen un uso. En la actualidad existen problemas en la alimentación de animales bovinos debido a la escases de fuentes de buena calidad de forraje durante la estación seca afecta a muchas regiones ganaderas , otro factor es la ganadería la explotación que se le da a los animales para obtener subproductos como leche y carne, forzó a los ganaderos para obtener estos productos lo más rápido posible a un bajo costo, lo cual lleva a obtener alimentos con altos contenidos de hormonas, esto aumenta la velocidad pero disminuye la calidad del producto y la inocuidad de los productos obtenidos del gano bovino. En la actualidad existen diversas materias primas de origen estos residuos podrían usarse como alimentos para animales especialmente para rumiantes que son los que pueden digerir estos materiales ricos en fibra debido a su mala calidad nutricional, tal es el caso como los residuos agroindustriales de piña. La piña es un alimento de la zona del Papaloapan el cual es procesado para obtener diferentes productos, el proceso que lleva la piña se pueden tener ciertos desechos los cuales ya no tienen un uso en las fábricas y son tomados como mermas, estos desechos pueden contaminar y generar gastos de transporte, sin embargo, estos desechos pueden tener un uso en la elaboración de alimentos balanceados para gano bovino. Usado el método de extrusión se buscará obtener un alimento balanceado para ganado bovino el cual tenga una alta aceptabilidad y un alto contenido nutricional, pueda ayudar a la nutrición del animal, siendo un alimento libre de aditivos como hormonas, por ende, mejorando la calidad de los productos obtenidos o derivados.

## **V. OBJETIVOS**

### **5.1. OBJETIVO GENERAL**

- Elaborar un alimento balanceado extrudido para ganado bovino aprovechando los desechos agroindustriales de la piña.

### **5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las características físico-químicas de la materia prima.
- Evaluar los parámetros de extrusión sobre las características físico-químicas y calidad del alimento balanceado.
- Determinar el grado de gelatinización de los productos extrudidos.
- Realizar la optimización del proceso.

## **6. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **6.1. OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA**

Los residuos agroindustriales de piña (*Ananas comosus*) fueron proporcionados por proveedores de la ciudad de San Juan Bautista Tuxtepec Oaxaca. Alfalfa (*Medicago sativa* L.), harina de maíz blanco (*Zea mays* L.), harina de soya, melaza y minerales de la marca San Antonio: cloruro de sodio 30.21%, magnesio 1.30%, azufre 6%, cromo 0.0002%, selenio 0.08%, potasio 2.10%, fosforo 6%, calcio 30.21%, cobre 0.21%, zinc 0.003%, humedad 5.0%, cobalto 0.009%, carbohidratos 10%, bromo 0.045%.

### **6.2. POLVO DE CÁSCARA DE PIÑA**

Se realizó un lavado de las cáscaras de piña en solución de cloro al 1% por 5 min y se cortaron en tamaños de 2 x 2 cm. Para retirar el exceso de humedad se exprimieron en tela pañalina y se colocaron en charolas de acero inoxidable, las cuales se sometieron a un proceso de secado 60 °C durante 24 h. las muestras secas se molieron y se tamizó en malla No. 35 (0.595 mm), el polvo de residuos de piña se almacenó en bolsas de polietileno marca Ziploc, para su posterior uso.

### **6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA**

La composición química proximal de las materias primas y a los extrudidos, se determinó por triplicado siguiendo los métodos estándar AOAC (2005): humedad (925.10), ceniza (923.03), proteína (920.87) y grasa (920,39). el contenido de carbohidratos totales se determinó por diferencia.

### **6.4. FORMULACIÓN DE DIETA**

La dieta control se estableció tomando como referencia el contenido nutricional apropiado para el animal. Para llevar a cabo el experimento se prepararon dos dietas balanceadas una a base de polvo de residuos agroindustriales de piña 25% (DP) y otra a base de harina de alfalfa 25% (DC) dieta control (Tabla 3). Antes de realizar el proceso de extrusión, las formulaciones de cada una de las dietas se mezclaron manualmente con la finalidad de obtener una distribución de humedad uniforme y fueron tamizadas para obtener un tamaño de partícula homogéneo de 0.595 mm.

**Tabla 3.** Formulación de dietas

INGREDIENTES	DIETA (%)	
	DP	DC
Harina de maíz	50	50
Harina de residuos de piña	25	0
Harina de alfalfa	0	25
Melaza	5	5
Harina de soya	10	10
Calcio	5	5
Fósforo	5	5

DC= dieta control DP= dieta con residuos de piña

## 6.5. PROCESO DE EXTRUSIÓN

La extrusión de las dietas se llevó a cabo un extrusor de tornillo simple marca Brabender (Modelo E19/25 D Instruments Inc South Hackensack, N.J. U.S.A), de laboratorio, de acuerdo con las siguientes condiciones: cuatro zonas de calentamiento Z1= 90 °C, Z2 = 100 °C, Z3 = 110 °C y Z4 = 120 - 150 °C; alimentación 200 g/min; velocidad de tornillo 200 rpm; fuerza de compresión del tornillo 1:1 y diámetro interno del dado de salida circular de 5 mm. Antes de extrudir se realizó el mezclado de las formulaciones, así como el ajuste del contenido de humedad de acuerdo con diseño de experimentos. Los extrudidos se secaron a 50 °C por 2 h, posteriormente se almacenaron en bolsas de polietileno selladas a temperatura ambiente para su análisis posterior.

## 6.6. ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (EME)

Fue calculada de acuerdo con la metodología de Pensamiento et al. (2018). Con la ecuación 1.

$$EME = (\Omega * \omega * 60) / m_{feed} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$\Omega$  = es el esfuerzo neto ejercido sobre el extrusor (N-m)

$\omega$  = es la velocidad angular del tornillo (rad/s) mfeed = es el flujo de masa (g/min).

## 6.7. TORQUE

El torque ( $T_o$ ) se obtuvo directamente del indicador en el panel de control del extrusor. Se registraron los valores promedio de las lecturas triplicadas para cada ejecución.

## 6.8. TIEMPO DE RESIDENCIA

Se midió de acuerdo con los procedimientos descritos por Likimani (1988). Se añadió un colorante rojo en la muestra en la zona de alimentación midiendo el peso y el tiempo en que transcurre la muestra, obteniéndose los gramos por minuto de proceso del producto.

## 6.9 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL ALIMENTO EXTRUDIDO

### 6.9.1 DENSIDAD APARENTE Y ÍNDICE DE EXPANSIÓN

La densidad aparente se determinó de acuerdo con la técnica reportada por Wang et al. (1993). A veinte muestras de extrudidos seleccionados al azar, se les determino el diámetro (d) y luego su longitud (L). A cada muestra se les tomaron tres mediciones del diámetro y se calculó el valor promedio. Posteriormente se pesaron cada extrudido ( $P_m$ ), para finalmente determinar la densidad utilizando la siguiente ecuación: Los resultados se expresaron en  $g/cm^3$ .

$$Densidad\ aparente = pm / (\pi(\frac{d}{2})^2 L) \quad Ec.2$$

El índice de expansión se determinó de acuerdo con el método de Gujska y Khan (1990) dividiendo el diámetro del extrudido entre el diámetro del orificio de la boquilla del extrusor.

### 6.9.2. DETERMINACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS EXTRUIDOS

Se realizó la evaluación química proximal (humedad, proteína, fibra, grasa, carbohidratos), para determinar la composición de los productos extrudidos. Los

métodos de determinación fueron los mismos que se utilizaron para la materia prima.

### **6.9.3. DUREZA**

De acuerdo con la metodología citada por Valenzuela-Lagarda et al. (2016) Se realizó la determinación de la fuerza máxima de ruptura por compresión (Rodríguez-Miranda et al., 2012) a las botanas extrudidas mediante un analizador de textura TA-XT2 (Texture Technologies Corp. Sacrsdale NY/Stable Micro Systems, Haslemere, Surrey, UK), la cual fue utilizado en modo de compresión, utilizando una cuchilla de corte Warner-Bratzler con una velocidad de ensayo de 5 mm/s. La dureza fue determinada en Newton (N) del promedio de la fuerza máxima requerida para romper el extrudido. Se realizaron 15 repeticiones por tratamiento, fueron reportados los valores medios.

### **6.9.4. DETERMINACIÓN DE GRADO DE GELATINIZACIÓN**

La determinación del grado de gelatinización se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Casas (1996), la cual se basa en la formación de un complejo azul por la adición de yodo, el cual reacciona con la amilosa liberada durante la gelatinización. A 0.04 g de muestra molida, se le agregaron 50 mL de KOH 0.060 M, se agitaron durante 15 min en un agitador magnético. La mezcla se centrifugó durante 5 min a 3000 rpm, se tomó una alícuota de 1 mL, y se mezcló con 9 mL de HCl 6.7 mM, posteriormente se agregaron 100 µL de reactivo de yodo (1 g de yodo y 4 g de yoduro de potasio/100 mL de agua). Se mezcló toda la mezcla para ser leída a 600 nm ( $a_1$ ), en un espectrofotómetro (Cary 60 UV-VIS MY11510011, ©Agilent Technologies, Inc., U.S.A).

La determinación se repitió utilizando 50 mL de KOH 0.4 M y 9 mL de HCl 0.0445 M, para obtener la segunda absorbancia ( $a_2$ ). El grado de gelatinización se calculó de acuerdo con la ecuación 1.

$$\text{Grado de gelatinización (\%)} = a_1 / a_2 \times 100 \quad (1) \quad \text{Ec3}$$

Dónde:  $a_1$  = Absorbancia 1,  $a_2$  = Absorbancia 2

### **6.9.5. DETERMINACIÓN DE COLOR**

El color se determinó con un colorímetro Hunter Lab (MiniScan Hunter Lab, modelo 45/0L, Hunter Associates Lab., Ind., Reston, Virginia U.S. A). sobre la

capa externa de la semilla, en la escala CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) siguiendo el procedimiento de Stojceska et al. (2009).

#### **6.9.6. ÍNDICES DE ABSORCIÓN DE AGUA (IAA) Y DE SOLUBILIDAD EN AGUA (ISA)**

El IAA y el ISA se determinaron por triplicado, mediante el proceso descrito por Anderson et al. (1969) con algunas modificaciones. Los extrudidos de cada tratamiento se trituraron en un molino casero a un tamaño de partícula (0.595 mm) malla 35, en un tubo de centrifuga previamente tarado se pesó 1 g de muestra y se agregaron 10 mL de agua destilada, se agitó durante 30 min, y se procedió a centrifugar a 5000 rpm durante 15 min. El sobrenadante se decantó hasta sequedad en una estufa a 97 °C; el residuo se pesó y se expresó como g de sólidos por gramos de muestra seca (ISA). Después de decantar el sobrenadante, el sedimento remanente en el tubo se pesó y se expresó como g de agua absorbida por g de muestra seca para obtener el IAA.

$$ISA = (\text{peso de sobrenadante seco} / \text{peso de la muestra seca}) \times 100(\%) \quad \text{Ec. 3}$$

$$IAA = \text{peso de sedimento} / \text{peso de la muestra seca} \left( \text{g de } \frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{g}} \text{ de muestra} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

### **6.10. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Se empleó un diseño central compuesto con dos variables independientes (temperatura, 120 - 150 °C y humedad, 16 - 22%), utilizando un software comercial (Design-Expert 8.0.2, Statease Inc., Minneapolis, MN, USA). Se analizó por regresión lineal múltiple y un análisis de varianza utilizando un software comercial según la metodología de Reyes-Jáquez et al. (2011). Los datos experimentales fueron ajustados con un modelo cuadrático de segundo orden (Myers, 1971), teniendo como variables de respuesta el índice de

expansión (IE), densidad aparente (DA), dureza, grado de gelatinización y los índices de absorción de agua (IAA), solubilidad en agua (ISA). Los datos obtenidos se realizaron por un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía, usando la prueba de Fisher ( $P < 0.05$ ). Los datos experimentales se ajustarán a los modelos seleccionados y los coeficientes de regresión obtenidos. Los términos de regresión se examinaron mediante un ANDEVA para cada respuesta.

### **6.11. OPTIMIZACIÓN**

La optimización numérica se realizó a través de la superposición de las diferentes superficies de respuestas (índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua, grado de gelatinización) de acuerdo con los máximos y mínimos encontrados y se establecerán en el programa Design Expert 7.0 (State-Ease Inc., Minneapolis, MN, USA) como valores óptimos, que deben contener las dietas extrudidas.

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. OBTENCIÓN DEL POLVO DE SUBPRODUCTOS DE PIÑA

A continuación, en la Tabla 4, se muestra el rendimiento del polvo de cáscara de piña (RAP), se obtuvo un mayor rendimiento de RAP con un 17.3%.

**Tabla 4.** Rendimiento de las materias primas.

Materia prima	Peso del lote (Kg)	Rendimiento (%)
Maíz	6.25	91.6 ± 0.14
Soja	6.30	89.5 ± 0.12
Residuos de piña	19.29	17.3 ± 0.07
Alfalfa	2.00	90.1 ± 0.17

### 7.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MATERIAS PRIMA

La composición química de las materias primas se muestra en la Tabla 5, donde se puede observar que en todos los componentes se encuentran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), los valores obtenidos de soja y maíz fueron similares a los reportados por Reyes-Jaques et al. (2011). Los valores del contenido de proteínas del polvo de cáscara de piña fueron 12.31%, para el contenido de fibra se obtuvieron valores de 11.69%, estos valores son mayores en cuanto al contenido de proteínas a los reportados por Rivera-Mirón et al. (2020), estas variaciones pueden deberse a la obtención de los residuos agroindustriales estos derivados de la variedad de la fruta, así como su procedencia geográfica.

**Tabla 5.** Composición Químico (%) proximal de las materias primas.

Muestra	Humedad	Cenizas	Grasas	Proteínas <sup>1</sup>	Fibra	ELN <sup>2</sup>
<b>Soya</b>	5.11 ± 0.04	6.57 ± 0.05	3.45 ± 0.36	27.22 ± 0.97	3.08 ± 0.88	54.57 ± 0.03
<b>Maíz</b>	6.21 ± 0.10	1.35 ± 0.03	3.73 ± 0.37	8.23 ± 0.53	1.52 ± 0.006	78.96 ± 0.06
<b>Piña</b>	7.00 ± 0.17	5.41 ± 0.03	2.09 ± 57	12.31 ± 0.38	11.69 ± 0.53	61.5 ± 0.01
<b>Alfalfa</b>	6.51 ± 0.11	4.57 ± 0.01	2.8 ± 0.24	16.5 ± 0.14	20.6 ± 0.18	49.02 ± 0.15

Los valores presentados son el promedio ± desviación estándar de tres determinaciones, <sup>1</sup>El factor utilizado fue de 6.25. <sup>2</sup> El valor obtenido por diferencia. \*Valores reportados en base seca, excepto la humedad. ELN = extracto libre de nitrógeno.

El contenido de fibra fue menor a los reportados por Aparecida-Damasceno et al. (2016) donde reportaron un mayor contenido de fibra en los subproductos de piña, esto podría deberse a la variedad de piña que utilizaron, así como el tipo de acondicionamiento de los residuos previos al secado, como se observa en la Tabla 5, el contenido de extracto libre de nitrógeno es mayor en el polvo de cáscara de piña en comparación con la harina de alfalfa esto puede deberse al contenido de azúcares presentes en el polvo de cáscara de piña en este caso fructosa, valores similares fueron presentados por Huang et al. (2011). El contenido de cenizas en las muestras es un factor importante indicador de minerales en los productos en este caso se obtuvieron valores de 5.41% mayores a los reportados por Ishak et al. (2021) esto puede deberse al proceso desecado ya que se genera vapor de agua el cual penetrar la cáscara de la piña, desencadena reacciones que procesan y liberan minerales inorgánicos.

### 7.3. ELABORACION DE LAS DIETAS A EXTRUDIR

Se prepararon las mezclas de ambas dietas de 200 g cada una de acuerdo con la formulación de la dieta Tabla 6 y al diseño experimental, obteniendo 11 tratamientos para cada dieta.

**Tabla 6.** Diseño experimental para ambas dietas.

Diseño experimental			Dieta con piña	Dieta control
Trat	Tem (°C)	Con.H (%)	Peso Mezclas (g)	Peso Mezclas (g)
1	120	16	200.07	200.51
2	135	19	200.15	200.67
3	135	14.76	200.22	200.17
4	120	22	200.06	200.47
5	135	19	200.74	200.13
6	150	16	200.00	200.01
7	156.21	19	200.07	200.03
8	113.79	19	200.02	200.20
9	150	22	200.02	200.32
10	135	19	200.00	200.00
11	135	23.2426	200.07	200.21

Trat: tratamiento, Tem. Temperatura, Con.H: contenido de humedad

### 7.4. PARÁMETROS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

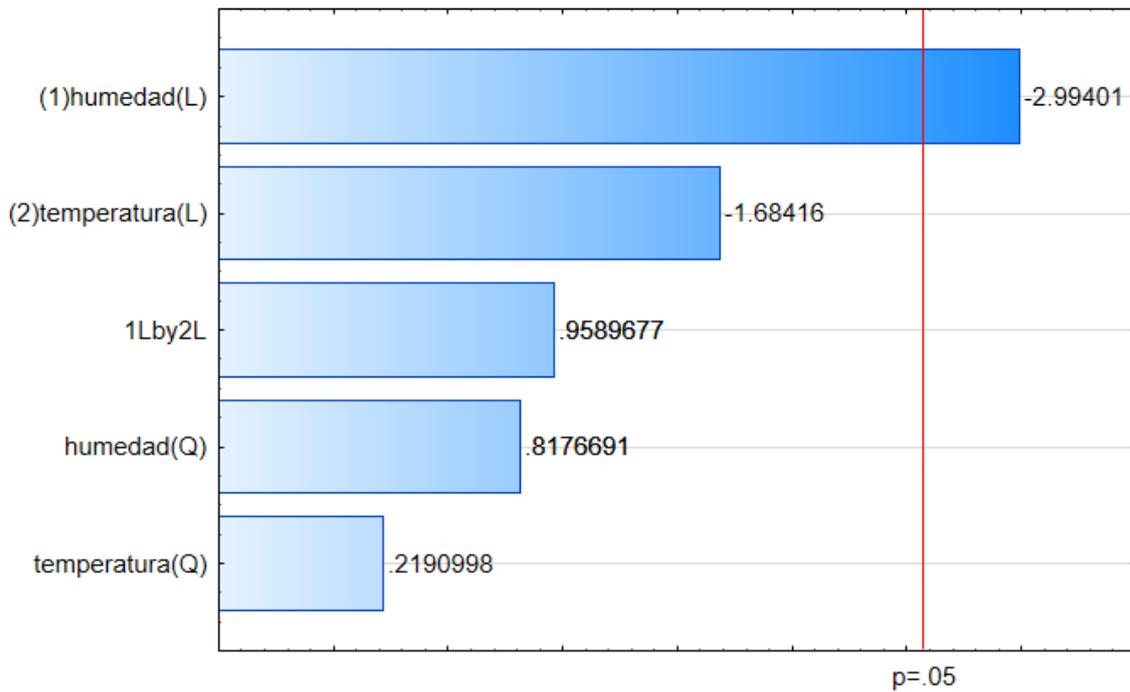
El valor más alto de energía mecánica específica (EME) se obtuvo en la dieta control (DC) (359.63 J/g) durante el proceso de extrusión en el tratamiento 1 (Tabla 7), en las condiciones 16% de humedad y 120 °C, en comparación con la

dieta con residuos de piña (DP) donde el valor más alto fue de 291.28 J/g, por otra parte, los valores más bajos se obtuvieron en DP (114.15 J/g) en el tratamiento 11 con las condiciones de 135 °C y 23.24% de humedad, para DC el valor más bajo de EME fue de 115.66 J/g en el tratamiento 11 con las mismas condiciones que en el caso de DP, Téllez-Morales et al. (2021), reporto valores experimentales con un intervalo de 247.85 a 882.92 J/g para EME, en botanas extrudidas adicionadas con Almidón de maíz y aislado de proteína de suero, durante el proceso de extrusión de ambas dietas se obtuvieron valores altos de EME con temperaturas entre 120-150 °C y contenidos de humedad bajos 16-19% Tabla 7, mientras que los valores bajos de EME, se obtuvieron en temperaturas de 135 °C y contenidos de humedad altos 23.24%, el contenido de humedad tuvo un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) negativo sobre la energía mecánica específica en ambas dietas Figura 4 y 5, el modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de EME mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.72$  en el caso de DC  $R^2 = 0.72$ , como se observa en la Tabla 8, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ).

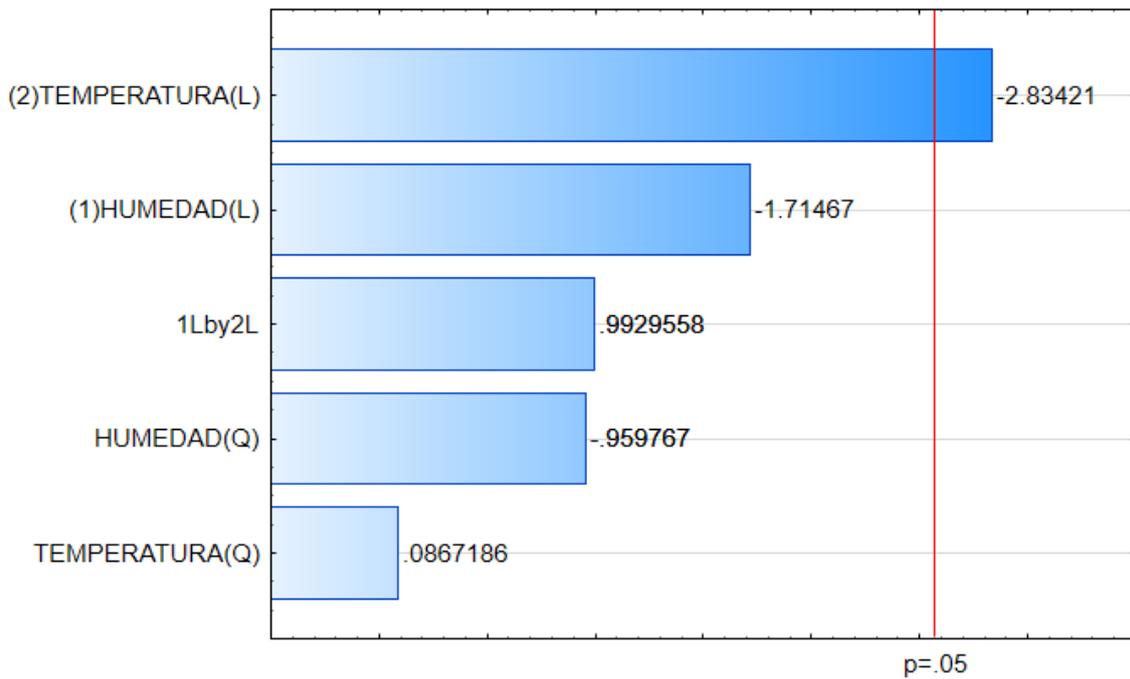
**Tabla 7.** Parámetros del proceso de extrusión de las dietas extrudidas.

H (%)	Dieta con piña					Dieta Control		
	T (°C)	Tr	Torque (Nm/s)	EME (J/g)	TR (g/min)	Torque (Nm/s)	EME (J/g)	TR (g/min)
16	120	1	36.32±0.67 <sup>a</sup>	291.28±5.7 <sup>a</sup>	78	45.96±0.97 <sup>a</sup>	359.63±7.62 <sup>a</sup>	78
19	135	2	22.62±0.8 <sup>c</sup>	185.88±6.57 <sup>cd</sup>	83.4	31.80±0.50 <sup>d</sup>	211.19±3.83 <sup>f</sup>	79.8
14.76	135	3	27.32±0.12 <sup>b</sup>	223.64±1.05 <sup>b</sup>	80.4	27.95±0.44 <sup>d</sup>	218.21±3.46 <sup>ef</sup>	75.4
22	120	4	21.48±0.09 <sup>c</sup>	183.81±0.81 <sup>cd</sup>	92.2	34.20±0.49 <sup>c</sup>	268.38±3.89 <sup>cd</sup>	85.8
19	135	5	20.50±0.36 <sup>c</sup>	174.54±2.14 <sup>cd</sup>	86.4	31.20±2.05 <sup>c</sup>	244.12±15.54 <sup>de</sup>	79.8
16	150	6	27.03±0.05 <sup>b</sup>	208.75±0.44 <sup>bc</sup>	77.6	26.70±1.88 <sup>d</sup>	207.87±14.70 <sup>f</sup>	78
19	156.21	7	15.52±1.25 <sup>de</sup>	125.24±10.13 <sup>ef</sup>	82.2	28.44±1.23 <sup>e</sup>	146.61±9.81 <sup>g</sup>	84
19	113.79	8	22.48±0.48 <sup>c</sup>	176.74±3.79 <sup>cd</sup>	79.8	34.35±2.63 <sup>c</sup>	271.47±20.83 <sup>c</sup>	82.8
22	150	9	21.37±5.72 <sup>c</sup>	169.55±45.42 <sup>d</sup>	85.2	28.70±1.58 <sup>b</sup>	311.85±12.74 <sup>b</sup>	88.2
19	135	10	18.53±0.23 <sup>cd</sup>	153.00±1.26 <sup>de</sup>	84	31.40±0.94 <sup>bc</sup>	277.72±7.40 <sup>c</sup>	82.2
23.2426	135	11	13.80±0.09 <sup>e</sup>	114.15±0.79 <sup>f</sup>	90	23.94±0.64 <sup>f</sup>	115.66±5.37 <sup>b</sup>	91.4

Los valores son la media ± desviación estándar (n = mínimo tres réplicas). los valores que no comparten una letra son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ). EME: Energía mecánica específica, TR: tiempo de residencia.



**Figura 4.** Diagrama de Pareto de la Energía mecánica específica (EME) de los extrudidos de la DP.



**Figura 5.** Diagrama de Pareto de la Energía mecánica específica (EME) de los extrudidos de la DC.

En general los valores altos de EME se obtuvieron a temperaturas bajas y contenidos de humedad bajos 16%, los valores bajos en ambas dietas se

obtuvieron a contenidos de humedad altos 20 - 23.24%, esto puede deberse a que a contenidos de humedad altos existe un mayor flujo másico en la cámara de extrusión por ende existe una reducción en el gasto de EME en el extrusor, la diferencia que existe entre DP y DC en el ligero aumento de EME en DC, puede deberse al contenido de fibra que existe en la mezcla de DC, ya que la alfalfa presenta un mayor contenido de fibra, la cual interactúa con moléculas de agua mediante puentes de hidrógenos, dejando una menor cantidad de agua disponible para que exista un mayor flujo másico, aumentando el gasto de EME en los extrudidos DC, esto puede ser explicado de la siguiente manera, al aumentar el contenido de humedad podría aumentar el grado de llenado del cilindro.

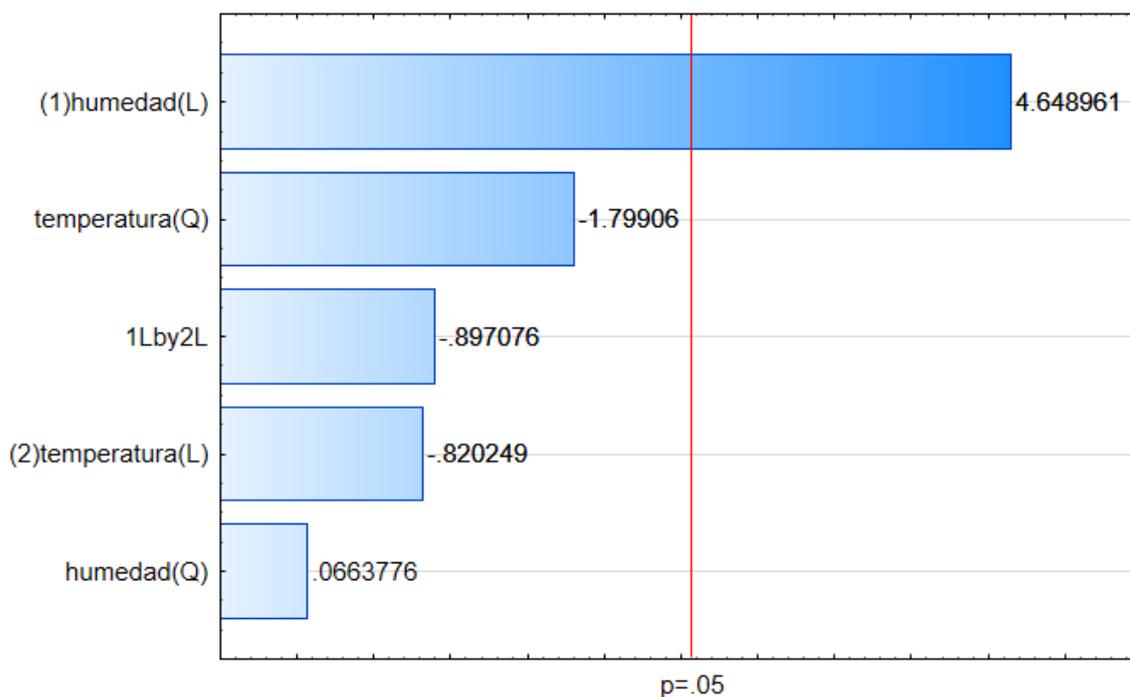
**Tabla 8.** Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple de los parámetros del proceso de extrusión de las dietas extrudidas.

Coeficientes	Dieta con Piña			Dieta control		
	Torque	EME	TR	Torque	EME	TR
Intercepto	20.55	171.1	84.6	31.47	242.6	80.6
A-Humedad	<b>-4.94</b>	<b>-37.69</b>	<b>4.4</b>	<b>-1.94</b>	<b>-29.11</b>	<b>4.9</b>
B-Temperatura	-2.39	-21.2	-0.78	<b>-4.14</b>	<b>-48.11</b>	0.51
A <sup>2</sup>	1.69	12.23	0.075	-1.47	-19.43	<b>1.74</b>
B <sup>2</sup>	0.91	3.27	-2.03	1.27	1.73	0.99
AB	2.26	17.07	-1.2	3.44	23.84	0.6
R <sup>2</sup>	0.737	0.728	0.842	0.72	0.72	0.95
P model	0.14	0.15	0.04	0.15	0.15	0.00
Lack of Fit	0.1228	0.12	0.204	0.003	6E-04	0.48

Los números en negrita indican estimaciones de parámetros significativos ( $p < 0.05$ ). EME: Energía mecánica específica; TR: Tiempo de residencia.

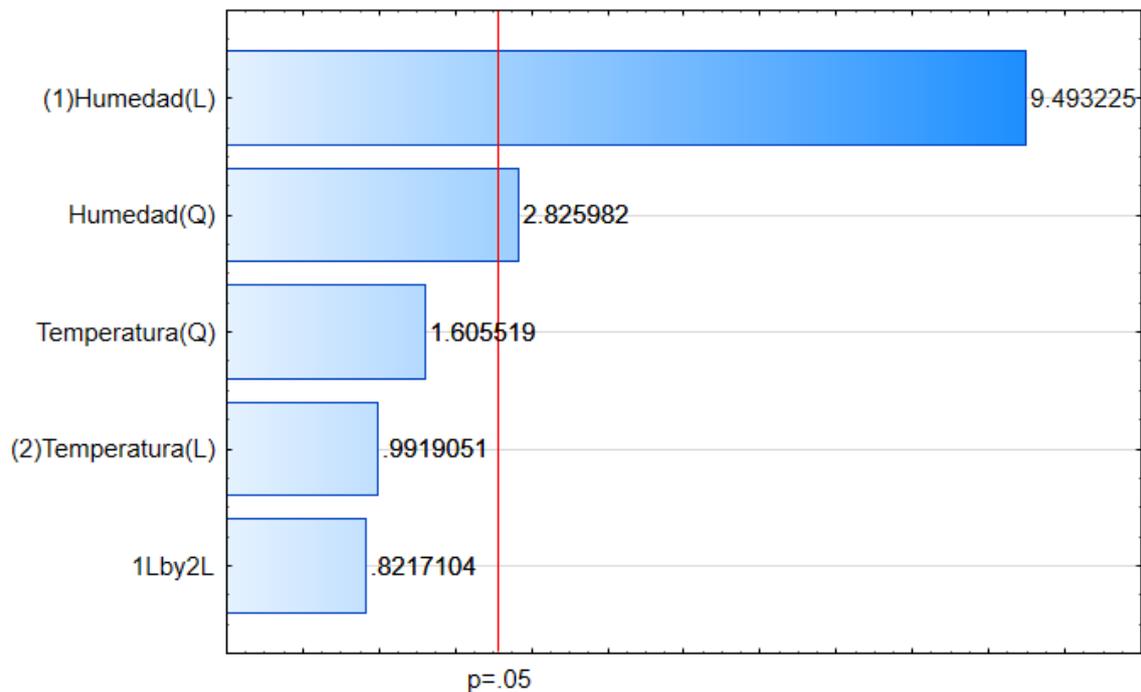
Lo que promueve el flujo de la masa fundida con un mayor caudal másico durante la extrusión, lo que lleva a un menor EME, también está directamente relacionado con la fricción interna del material durante la extrusión Pensamiento-Niño et al. (2018) y Rivera-Mirón et al. (2020) informaron que al aumentar el contenido de fibra en productos extrudidos en la mezcla aumentó la EME, lo que podría deberse a la presencia de azúcares ya que los carbohidratos de bajo peso molecular pueden aumentar la viscosidad de la masa fundida, actuando como plastificantes.

El mayor tiempo de residencia (TR) (92.2 g/min), en DP se obtuvo en el tratamiento 4 elaborado con 22% de humedad y 120 °C, para la DC el mayor tiempo de residencia (91.4 g/min) se obtuvo en el tratamiento 11 elaborado con 23.24% de humedad y 135 °C (Tabla 7), para los extrudidos DP los mayores TR se obtuvieron en los tratamientos con un mayor contenido de humedad 19-23.24% y temperaturas de 120 a 150 °C, en el caso de los extrudidos DC los mayores tiempos de residencia se obtuvieron con mayores contenidos de humedad 19 a 23.24%, el contenido de humedad tuvo un efecto significativo positivo ( $p < 0.05$ ) en ambas dietas Figuras 6 y 7, el modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales del TR mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.84$  en el caso de DP y para DC  $R^2 = 0.95$  como se observa en la Tabla 8, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ).



**Figura 6.** Diagrama de Pareto del Tiempo de residencia de los extrudidos DP.

En la Figura 6 y 7, se observa que el contenido de humedad mostró efecto significativo en el diagrama de Pareto, generalmente esto se debe a que hay un aumento del contenido de humedad, el cual induce a una disminución de la viscosidad, al igual que en sistemas con altos contenidos de lípidos (Rodríguez-Miranda et al., 2012).

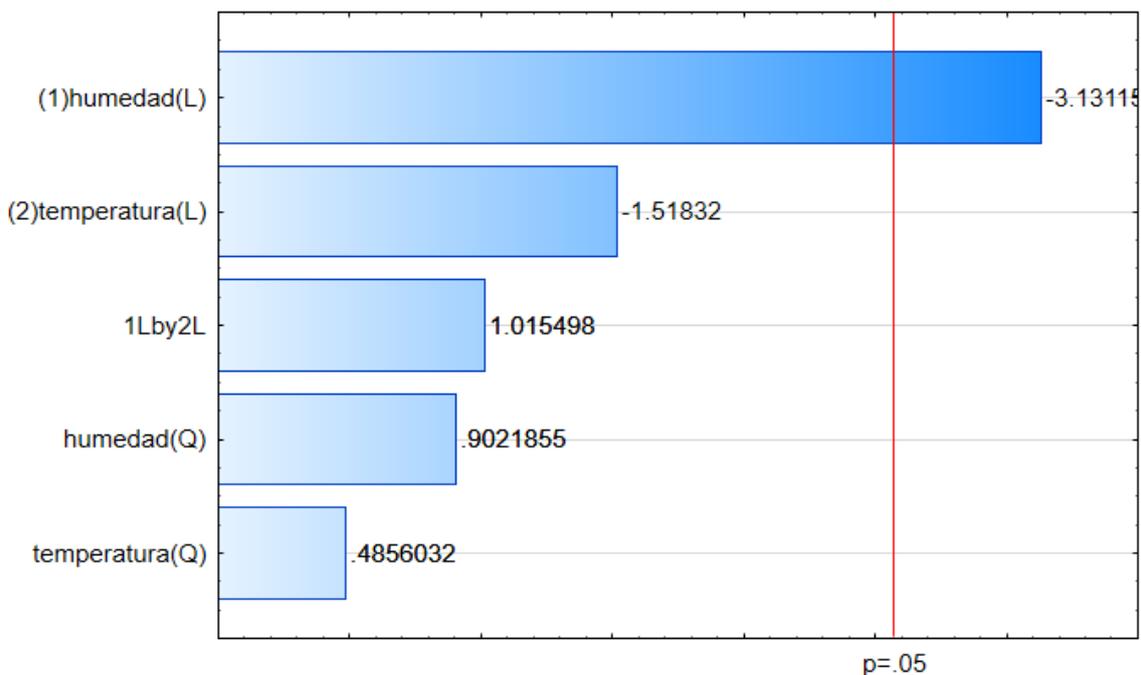


**Figura 7.** Diagrama de Pareto del Tiempo de residencia de los extrudidos DC.

El tiempo de residencia está relacionado directamente con el torque y la EME ya que al obtener un menor torque se obtiene un mayor tiempo de residencia esto debido a que existe un mayor flujo másico durante la extrusión, en general se obtuvieron mayores tiempos de residencia en los extrudidos DP en lugar de los DC esto puede ser debido a la relación que existe entre el contenido de proteínas y fibras en los extrudidos DC disminuyendo el contenido de agua disponible en la matriz, lo cual aumenta el torque por ende se obtienen menores tiempos de residencia, esto es de acuerdo a lo reportado por Pensamiento-Niño et al. (2018), aumentando el contenido de agua en los extrudidos provoca una disminución en la viscosidad de la mezcla, teniendo un efecto similar al de los altos niveles de lípidos en el sistema.

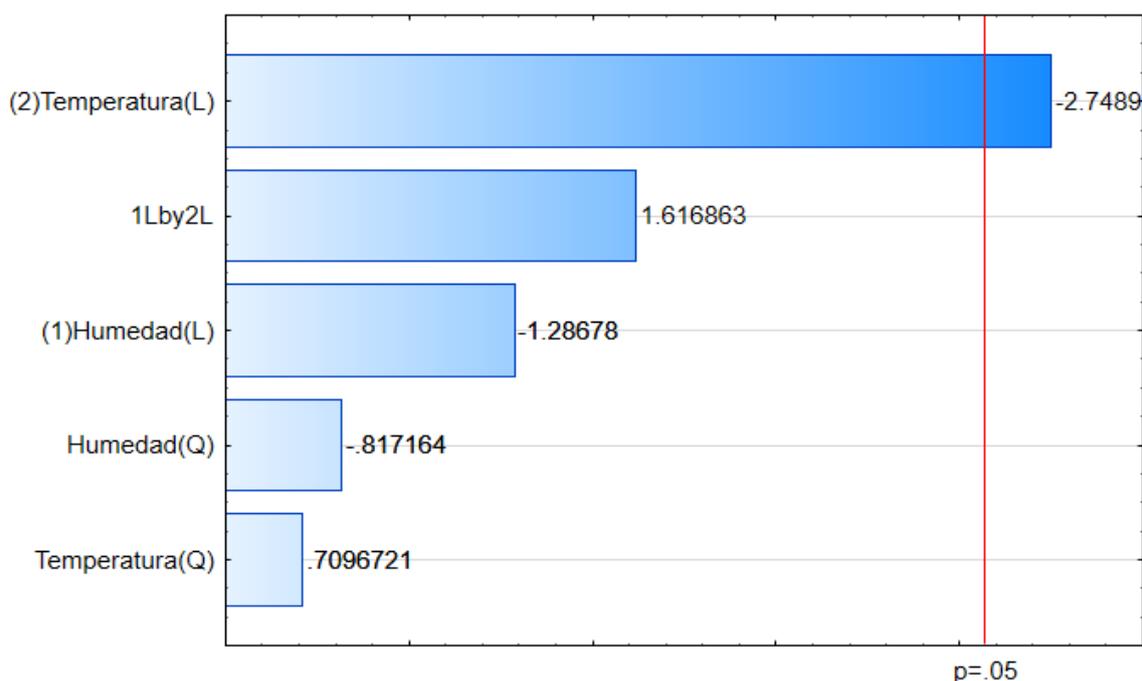
El mayor valor obtenido del torque (36.32 Nm/s) en los extrudidos DP fue en el tratamiento 1, y para los extrudidos DC el mayor valor de torque (45.95 Nm/s) se obtuvo en el tratamiento 1, para ambas dietas los menores valores de torque se obtuvieron en el tratamiento 11, donde las condiciones de extrusión fueron, contenido de humedad 23.24% y temperatura de 135 °C Tabla 7, el modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales del Torque mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.73$  en el caso de DP y para DC  $R^2 = 0.72$

como se observa en la Tabla 8, el modelo de regresión no fue significativo en ambos casos ( $p < 0.05$ ). En ambas dietas el contenido de humedad tuvo un efecto significativo negativo ( $p < 0.05$ ) Figura 8 y 9 ya que, al aumentar el contenido de humedad el torque disminuye proporcionando un mayor TR y un menor gasto de energía de operación del extrusor, existe un mayor valor del torque en la dieta control esto debido a la relación que existe en la EME, los extrudidos DC contienen un mayor contenido de fibra lo cual aumenta el esfuerzo de torque debido a la poca disponibilidad de agua en el extrusor, esta misma tendencia presento Kannadhasan et al. (2009), el aumento de los valores de contenido de humedad, puede minimizar la dificultad de procesamiento de las mezclas. En general, el valor del torque tiende a disminuir al aumentar los valores de Temperaturas debido a una disminución de la viscosidad.



**Figura 8.** Diagrama de Pareto del torque extrudidos DP.

Téllez-Morales et al. (2021) explicaron que las altas velocidades del tornillo también inducirían un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento de la masa fundida de almidón, lo que daría como resultado una disminución de la viscosidad de la masa fundida y, en consecuencia, una disminución del torque.



**Figura 9.** Diagrama de Pareto del Torque extrudidos DC.

## 7.5. PARÁMETROS FÍSICOS DE LAS DIETAS EXTRUDIDAS

El índice de expansión (IE) es uno de los parámetros más importantes, está relacionado con la densidad aparente (DA) (Reyes-Jaques et al., 2011). Los parámetros físicos de ambas dietas extrudidas se muestran en la Tabla 8, los valores más altos de IE (1.11) de la DP se obtuvieron en el tratamiento 2, con las condiciones de extrusión, contenido de humedad 19%, temperatura de 135 °C, el valor más bajo de IE (1.06) se encontró en el tratamiento 8 donde las condiciones de extrusión fueron 19% contenido de humedad y temperatura de 113.79 °C (Tabla 9), para los extrudidos DC el valor más alto de IE (1.14) se encontró en el tratamiento 5 con las condiciones de extrusión siguientes, contenido de humedad 19% y temperatura 135 °C, el valor más bajo se encontró en el tratamiento 6 en las condiciones de extrusión de 16% contenido de humedad 150 °C (Tabla 9), el modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales del IE mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.74$  en el caso de DP y para DC  $R^2 = 0.80$  como se observa en la Tabla 10, el modelo de regresión no fue significativo en ambos casos ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 9.** Parámetros físicos de las dietas extrudidas dieta con piña y dieta control.

Tr	H%	T °C	Dieta con piña			Dieta control		
			IE	DA (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza (N)	IE	DA (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza (N)
1	16	120	1.10±0.11 <sup>b</sup>	1.09±0.37 <sup>cd</sup>	53.83±12.87 <sup>b</sup>	1.08±0.13 <sup>abc</sup>	1.16±0.63 <sup>a</sup>	57.74±15.06 <sup>ab</sup>
2	19	135	1.11±0.07 <sup>a</sup>	1.07±0.15 <sup>cde</sup>	59.34±9.23 <sup>b</sup>	1.11±0.05 <sup>a</sup>	1.11±0.09 <sup>a</sup>	47.64±14.51 <sup>ab</sup>
3	14.76	135	1.11±0.11 <sup>b</sup>	1.07±0.61 <sup>cde</sup>	55.32±13.67 <sup>b</sup>	1.05±0.11 <sup>bc</sup>	1.31±0.60 <sup>a</sup>	44.99±6.15 <sup>a</sup>
4	22	120	1.08±0.12 <sup>b</sup>	1.10±0.63 <sup>bc</sup>	85.75±27.40 <sup>a</sup>	1.13±0.10 <sup>abc</sup>	1.02±0.62 <sup>a</sup>	61.74±18.59 <sup>ab</sup>
5	19	135	1.10±0.02 <sup>bc</sup>	1.06±0.19 <sup>e</sup>	59.38±9.23 <sup>b</sup>	1.14±0.12 <sup>c</sup>	1.18±0.86 <sup>a</sup>	64.86±13.26 <sup>ab</sup>
6	16	150	1.09±0.02 <sup>bc</sup>	1.07±0.11 <sup>de</sup>	66.49±15.42 <sup>ab</sup>	0.89±0.13 <sup>ab</sup>	1.45±0.46 <sup>a</sup>	48.34±13.25 <sup>ab</sup>
7	19	156.2	1.10±0.01 <sup>bc</sup>	1.06±0.15 <sup>e</sup>	74.64±18.40 <sup>ab</sup>	0.96±0.03 <sup>abc</sup>	1.04±0.06 <sup>a</sup>	70.34±15.90 <sup>a</sup>
8	19	113.8	1.06±0.01 <sup>bc</sup>	1.13±0.05 <sup>a</sup>	61.71±12.98 <sup>b</sup>	1.04±0.02 <sup>abc</sup>	1.25±0.05 <sup>a</sup>	62.24±18.39 <sup>ab</sup>
9	22	150	1.07±0.05 <sup>bc</sup>	0.94±0.11 <sup>f</sup>	54.01±11.67 <sup>b</sup>	0.95±0.04 <sup>abc</sup>	0.94±0.20 <sup>a</sup>	60.74±12.02 <sup>ab</sup>
10	19	135	1.11±0.11 <sup>a</sup>	1.07±0.47 <sup>cde</sup>	59.33±9.23 <sup>b</sup>	1.01±0.03 <sup>abc</sup>	1.01±0.11 <sup>a</sup>	48.96±12.02 <sup>ab</sup>
11	23.243	135	1.07±0.01 <sup>bc</sup>	1.11±0.04 <sup>ab</sup>	59.98±17.46 <sup>b</sup>	1.13±0.13 <sup>bc</sup>	0.97±0.65 <sup>a</sup>	66.60±19.75 <sup>ab</sup>

Los valores son la media ± desviación estándar (n = tres determinaciones); los valores que no comparten una letra son significativamente diferentes. IE= índice de expansión, DA= densidad aparente.

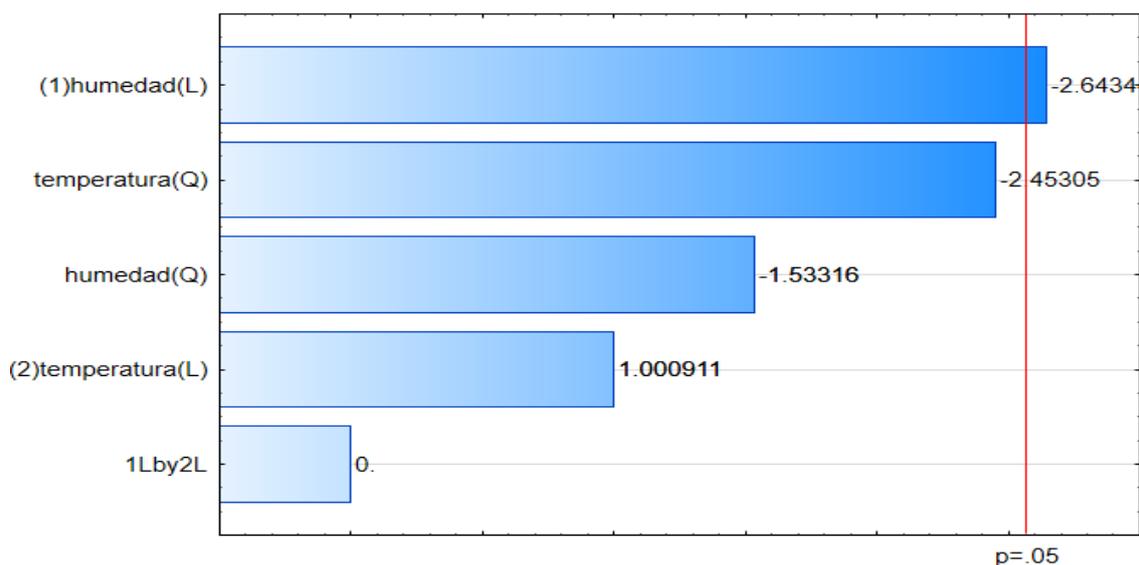
Lo anterior es debido a que el contenido de humedad y temperatura de extrusión Figura 10-11 tuvieron efectos significativos ( $p < 0.05$ ) negativos y positivos respectivamente sobre este parámetro en ambas dietas (Tabla 10), los valores de IE en ambas dietas fueron bajos (1.11 - 1.14), esto puede ser debido a que a contenido de humedades bajas y el incremento de la temperatura en el proceso de extrusión ayuda a obtener productos extrudidos con una mayor expansión, esto puede atribuirse a que la expansión es un proceso complejo, que se realiza a temperaturas altas y bajos contenidos de humedad, produciendo transformaciones estructurales de los biopolímeros, transiciones y transformaciones de fases que conducen al origen de burbujas de aire en el interior del almidón lo cual propicia a la retención de las burbujas de aire después de la salida del mismo material (Moraru y Kokini 2003).

Esto puede deberse a la cantidad de azúcares presentes en la DP debido a los residuos de piña a altas temperaturas llegan a generar una caramelización lo cual genera interferencia de las burbujas de aires disminuyendo la expansión de los extrudidos, en general productos extrudidos con altas cantidades de fibras tienden a tener menores IE, investigaciones anteriores (Ačkar et al., 2018) han demostrado que las fibras pueden unir el agua con más fuerza que el almidón y por lo tanto, reduce la pérdida de agua en el troquel, que directamente afecta la expansión del producto.

**Tabla 10.** Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple de los parámetros físicos de las dietas extrudidas.

Coeficientes	Dieta con piña			Dieta control		
	IE	DA	Dureza	IE	DA	Dureza
Intercepto	1.11	0.015	59.35	1.09	1.11	48.52
A-Humedad	<b>-0.012</b>	5.03E-04	3.25	0.022	<b>-0.14</b>	<b>5.87</b>
B-Temperatura	4.75	9.73E-03	-0.099	<b>-0.061</b>	-0.01	0.13
A <sup>2</sup>	-8.33	6.13E-06	-0.32	-0.018	0.018	2.66
B <sup>2</sup>	-0.013	7.08E-05	4.94	-0.012	0.021	<b>7.61</b>
AB	0	4.90E-03	<b>-11.1</b>	3.24E-33	-0.09	2.1
R <sup>2</sup>	0.74	0.64	0.78	0.70	0.80	0.84
P model	0.13	0.26	0.09	0.19	0.07	0.04
Lack of Fit	0.11	0.01	0.0001	0.54	0.39	0.01

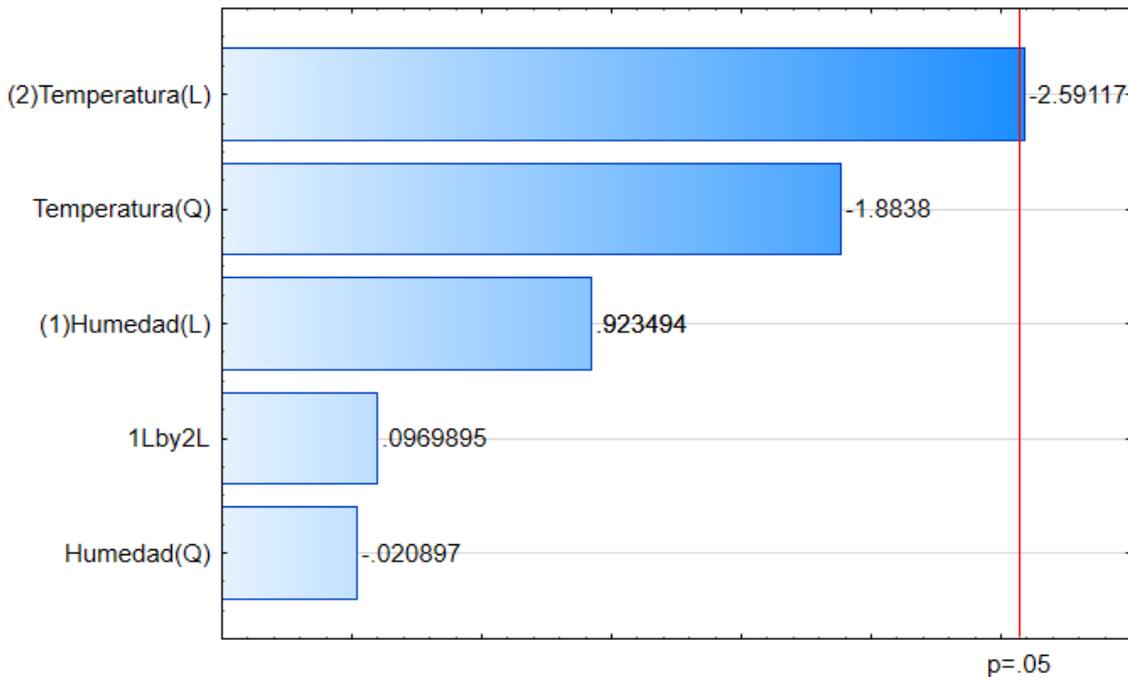
Los números en negrita indican estimaciones de parámetros significativos ( $p < 0.05$ ). DA: densidad aparente; IE. Índice de expansión.



**Figura 10.** Diagrama de Pareto del índice de expansión de los extrudidos DP.

Otro factor que pudiese afectar la expansión de los extrudidos es el alto contenido de proteínas debido a la harina de soja, residuos de piña en el caso de DP y la alfalfa en la DC, esto debido a la desnaturalización de las proteínas a temperaturas altas de extrusión, teniendo interacciones con las moléculas de agua presentes en la masa lo cual interfiere en la formación de burbujas de aires

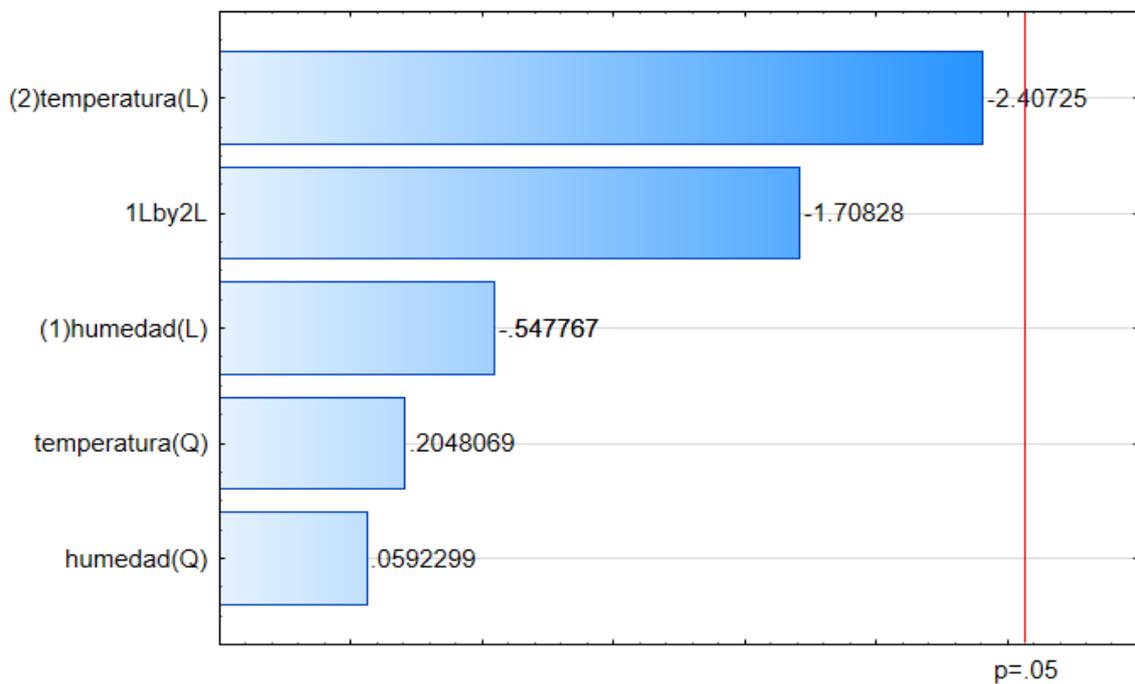
dando como resultado productos extrudidos más compactos. Amaya-Llano et al. (2007) mencionan que las proteínas afectan la expansión debido a su capacidad de afectar la distribución del agua en la matriz, así como su conformación y estructura macromolecular, afectando las propiedades extensionales de los fundidos extrudidos.



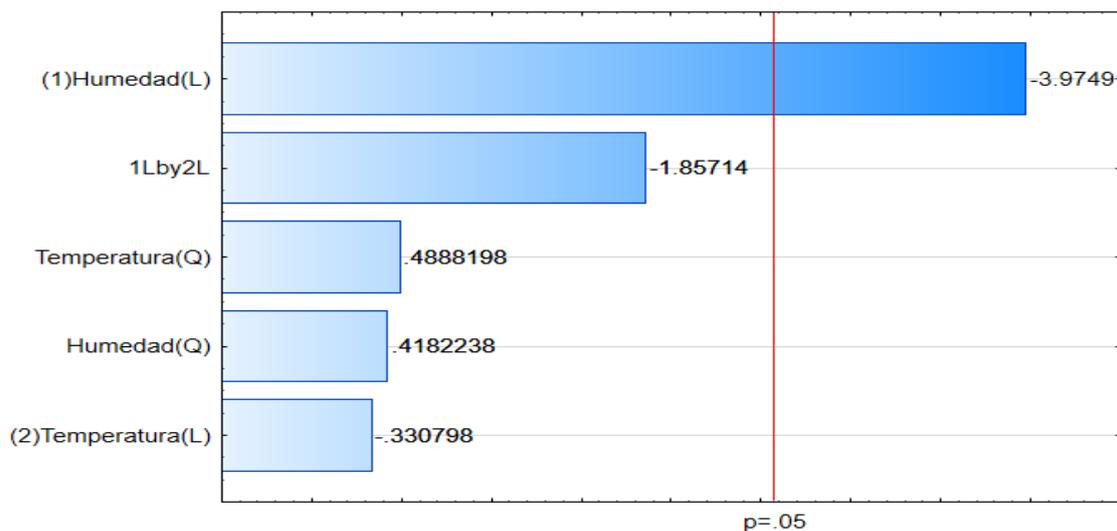
**Figura 11.** Diagrama de Pareto del índice de expansión de los extrudidos DC.

Los valores de la DA en los extrudidos DP fueron de 0.94 a 1.13 g/cm<sup>3</sup> (Tabla 9). El tratamiento 9 fue el que presentó menor densidad aparente, de acuerdo con las siguientes condiciones: temperatura de 150 °C, contenido de humedad de 22%. Por otro lado, el tratamiento con mayor densidad se obtuvo en el Tratamiento 8 bajo las siguientes condiciones: temperatura de 113 °C, contenido de humedad de 19%. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de la DA mostró un valor del coeficiente de determinación R<sup>2</sup> = 0.64 como se observa en la Tabla 9, el modelo de regresión no fue significativo (p < 0.05), en este caso ninguna de las variables presento un efecto significativo (p < 0.05), como se observa en el diagrama de Pareto (Figura 12). Los valores de la DA para los extrudidos DC fueron de 0.94 a 1.45 g/cm<sup>3</sup> (Tabla 8). El tratamiento 9 fue el que presentó menor densidad aparente, de acuerdo con las

siguientes condiciones: temperatura de 150 °C, contenido de humedad de 22%. Por otro lado, el tratamiento con mayor densidad se obtuvo en el Tratamiento 6 bajo las siguientes condiciones: temperatura de 150 °C, contenido de humedad de 16%. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de la DA mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.80$  como se observa en la Tabla 10, el modelo de regresión no fue significativo ( $p < 0.05$ ). En este caso el contenido de humedad presento un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) negativo, como se puede observar en la Figura 13.



**Figura 12.** Diagrama de Pareto de la densidad aparente de los extrudidos DP.

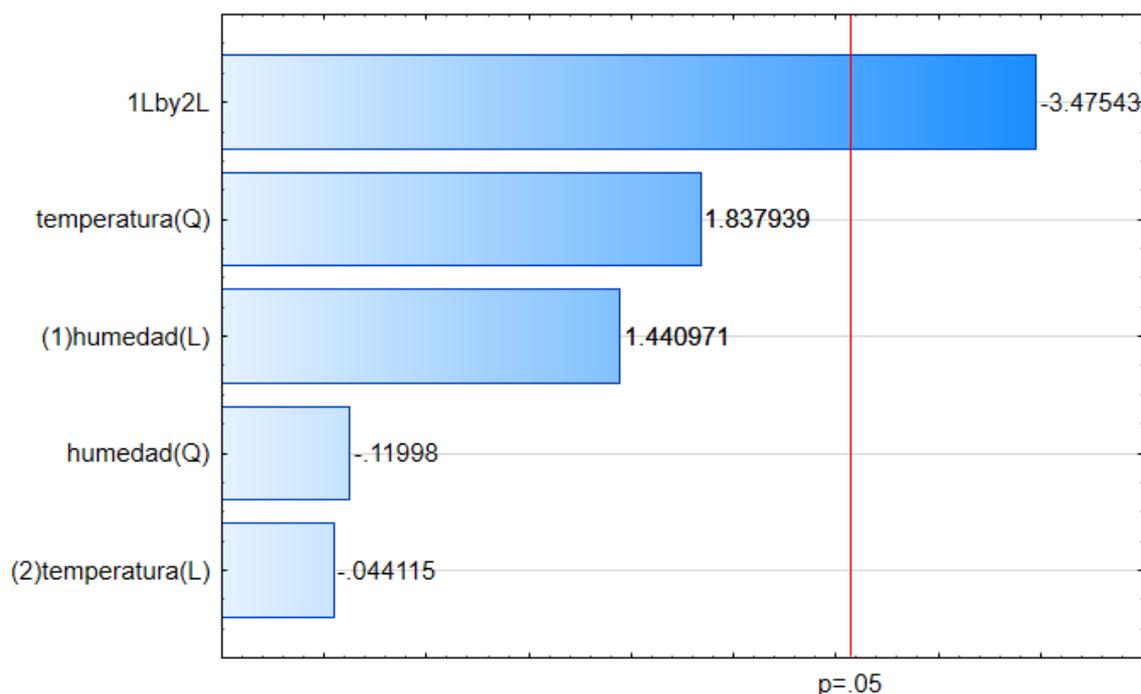


**Figura 13.** Diagrama de Pareto de la densidad aparente de los extrudidos DC.

En general el contenido de humedad tuvo un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) para la DA, La DA de las dietas extrudidas está directamente relacionada con la expansión que se produce durante la extrusión (Reyes-Jaques et al., 2011), en este caso los valores altos de DA en los extrudidos pudiera deberse a los altos contenidos de fibras presentes en la mezcla ya que estas interactúan con las moléculas de agua, proporcionando la ruptura de burbujas de aires en los extrudidos lo cual aumenta la obtención de extrudidos con una mayor densidad, esta misma tendencia la presento Selani et al. (2014) en productos extrudidos con orujos de piña, menciona que esto puede explicarse por la cantidad de fibra y azúcar presente en el polvo de piña., estos compuestos tienen la capacidad de absorber agua, lo que puede dar lugar a productos con mayor densidad. Asimismo, con la reducción en la expansión de los extruidos con adición de fibra, se esperaba un aumento en la densidad, ya que se podrían compactar más productos en un volumen dado. Otro factor que pudiese influir en la expansión de los productos extrudidos es el contenido de fibras presentes, ya que estas al desnaturalizarse generan enlaces con sus grupos hidrofílicos, lo cual disminuya la gelatinización del almidón, aumentando la densidad aparente de los extrudidos. Thakur et al., (2017) mencionan que el contenido de proteína tiene una correlación inversa con la capacidad de expansión de los productos extruidos; cuanto mayor es el contenido de proteínas, menor es la expansión y, por tanto, más densos son los productos.

La dureza es una de las propiedades fisicoquímicas del producto extruido que está fuertemente relacionada con la temperatura de extrusión de la materia prima y el contenido de humedad como su contenido de almidón (De Pilli et al., 2008). Los valores de la dureza se pueden observar en la Tabla 9, Los valores de la Dureza en los extrudidos DP fueron de 53.83 a 85.75 N. El tratamiento 1 fue el que presentó menor Dureza, de acuerdo con las siguientes condiciones: temperatura de 120 °C, contenido de humedad de 16%. Por otro lado, el tratamiento con mayor densidad se obtuvo en el Tratamiento 4 bajo las siguientes condiciones: temperatura de 120 °C, contenido de humedad de 22%. El modelo de regresiónajustado a los resultados experimentales de la Dureza mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.78$  como se observa en la

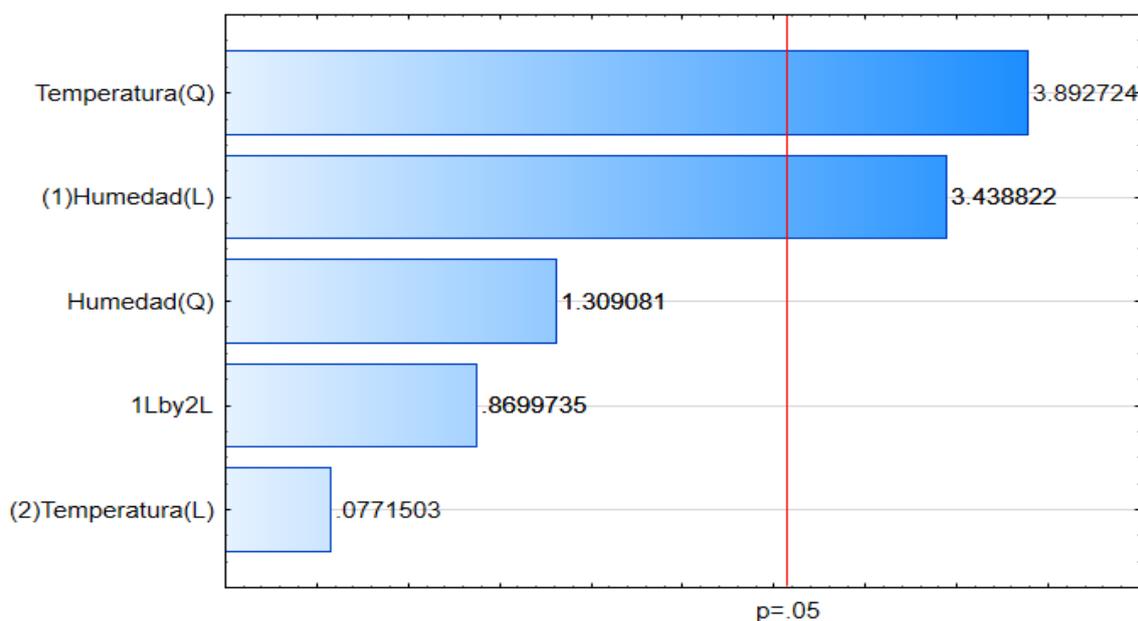
Tabla 10, el modelo de regresión no fue significativo ( $p < 0.05$ ). en este caso ninguna de las variables presento un efecto significativo ( $p < 0.05$ ), sin embargo, la interacción de la temperatura y el contenido de humedad tuvieron un efecto significativo negativo en la dureza como se puede observar en la Figura 14.



**Figura 14.** Diagrama de Pareto de la dureza de los extrudidos de la DP.

En el caso de los extrudidos DC los valores de la Dureza en los extrudidos DP fueron de 44.99 a 70.34 N. El tratamiento 3 fue el que presentó menor Dureza, de acuerdo con las siguientes condiciones: temperatura de 135 °C, contenido de humedad de 14.76%. Por otro lado, el tratamiento con mayor densidad se obtuvo en el Tratamiento 7 bajo las siguientes condiciones: temperatura de 156.121 °C, contenido de humedad de 19%. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de la Dureza mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.84$  como se observa en la Tabla 10, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ). en este caso la humedad y el cuadrático de la temperatura presentaron un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) en la dureza como se observa en la Figura 15. Ambas dietas al aumentar el contenido de humedad la dureza de los productos extrudidos aumento, esto puede deberse a que el aumento del contenido de

humedad y altas temperaturas permiten que la materia prima sufra una transición vítrea durante el proceso de extrusión, lo cual facilita la deformación de la matriz y su expansión, sin embargo, existe un rango de temperatura en el cual la expansión alcanza un máximo y esta temperatura depende del almidón, si no llega a la temperatura adecuada, el exceso de agua aumenta la rigidez y la dureza del producto final.



**Figura 15.** Diagrama de Pareto de la dureza de los extrudidos DC.

Por otra parte, Ačkar et al. (2018) mencionan que las propiedades de la textura están directamente relacionadas con la expansión y la densidad aparente de productos extruidos. Otro factor importante en el aumento de la dureza de los productos extruidos es la fibra presente en los extrudidos ya que esta también juega un papel importante, el aumento de la cantidad de fibras de origen vegetal suele aumentar la dureza del producto debido a la reducción del espesor de la pared celular y su ruptura prematura (Lazou & Krokida, 2010; Nascimento et al., 2012; Yanniotis et al., 2007). La disminución de dureza con el aumento de temperatura se puede atribuir al hecho de que el aumento de la temperatura en el barril disminuye la viscosidad de la masa requerida para producir un producto de baja densidad, lo que resulta en la formación de pequeñas burbujas con paredes delgadas y la producción de materiales con los valores bajos de dureza (Rivera-Miron et al., 2020).

## 7.6. PROPIEDADES FUNCIONALES DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS.

Los resultados de las propiedades funcionales se muestran en la Tabla 11, el tratamiento 8 fue el que presento menor IAA, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 19% y temperatura de 113.79 °C. por otro lado el tratamiento 9 fue el que presento mayor IAA, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 22% y temperatura de 150 °C. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales del IAA mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.79$  como se observa en la Tabla 10, el modelo de regresión no fue significativo ( $p < 0.05$ ) (Tabla 12). En este caso ninguna de las variables presento un efecto significativo ( $p < 0.05$ ), sin embargo, el cuadrático de la temperatura tuvo un efecto significativo negativo en el IAA como se puede observar en la Figura 16.

**Tabla 11.** Propiedades funcionales, pH de dieta con piña y dieta control.

Tr	H (%)	T (°C)	Dieta con piña			Dieta control		
			IAA (g/g)	ISA (%)	pH	IAA (g/g)	ISA (%)	pH
1	16	120	3.74±0.11 <sup>a</sup>	12.41±0.23 <sup>cd</sup>	5.49±0.01 <sup>e</sup>	3.99±0.11 <sup>b</sup>	7.43±0.72 <sup>bcd</sup>	6.19±0.00 <sup>cd</sup>
2	19	135	3.76±0.09 <sup>a</sup>	14.07±0.11 <sup>a</sup>	5.60±0.01 <sup>ab</sup>	4.21±0.08 <sup>ab</sup>	7.15±0.11 <sup>cde</sup>	6.19±0.00 <sup>cd</sup>
3	14.76	135	3.77±0.06 <sup>a</sup>	13.29±0.08 <sup>ab</sup>	5.53±0.02 <sup>cde</sup>	3.87±0.20 <sup>b</sup>	7.31±0.18 <sup>bcd</sup>	6.16±0.01 <sup>de</sup>
4	22	120	3.51±0.01 <sup>b</sup>	13.69±0.23 <sup>ab</sup>	5.51±0.01 <sup>e</sup>	4.15±0.05 <sup>ab</sup>	8.31±0.37 <sup>ab</sup>	6.12±0.02 <sup>f</sup>
5	19	135	3.76±0.09 <sup>a</sup>	14.07±0.11 <sup>a</sup>	5.57±0.02 <sup>bcd</sup>	3.97±0.16 <sup>b</sup>	7.35±0.38 <sup>abc</sup>	6.16±0.00 <sup>e</sup>
6	16	150	3.90±0.11 <sup>a</sup>	13.6±0.10 <sup>ab</sup>	5.60±0.00 <sup>ab</sup>	4.46±0.11 <sup>a</sup>	7.41±0.49 <sup>bcd</sup>	6.23±0.00 <sup>a</sup>
7	19	156.2	3.51±0.06 <sup>b</sup>	11.59±0.23 <sup>e</sup>	5.65±0.01 <sup>a</sup>	3.45±0.05 <sup>c</sup>	6.37±0.14 <sup>de</sup>	6.22±0.00 <sup>ab</sup>
8	19	113.8	3.24±0.02 <sup>c</sup>	13.02±0.49 <sup>bc</sup>	5.54±0.01 <sup>cde</sup>	3.36±0.02 <sup>c</sup>	8.84±0.37 <sup>a</sup>	6.09±0.01 <sup>g</sup>
9	22	150	3.93±0.04 <sup>a</sup>	12.20±0.15 <sup>de</sup>	5.52±0.01 <sup>de</sup>	4.46±0.01 <sup>a</sup>	6.57±0.17 <sup>de</sup>	6.22±0.01 <sup>ab</sup>
10	19	135	3.87±0.01 <sup>a</sup>	13.46±0.60 <sup>ab</sup>	5.57±0.01 <sup>bcd</sup>	3.95±0.06 <sup>b</sup>	7.35±0.55 <sup>bcd</sup>	6.10±0.00 <sup>cde</sup>
11	23.24	135	3.82±0.07 <sup>a</sup>	13.48±0.08 <sup>ab</sup>	5.57±0.02 <sup>bc</sup>	4.27±0.33 <sup>ab</sup>	6.05±0.18 <sup>e</sup>	6.20±0.00 <sup>bc</sup>

Los valores son la media ± desviación estándar (n = tres determinaciones). Los valores que no compartan una letra son significativamente diferentes. IAA = índice de absorción de agua; ISA = índice de solubilidad en agua.

Los valores de Índice de absorción de agua (IAA) en los extrudidos DC fueron de 3.36 a 4.46 (g/g). El tratamiento 8 fue el que presento menor IAA, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 19% y temperatura de 113.79 °C. por otro lado el tratamiento 9 fue el que presento mayor IAA, de

acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 22% y temperatura de 150 °C. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales del IAA mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.86$  como se observa en la Tabla 10, el modelo de regresión no fue significativo ( $p < 0.05$ ) Tabla 12. En este caso la temperatura presento un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) (Figura 17).

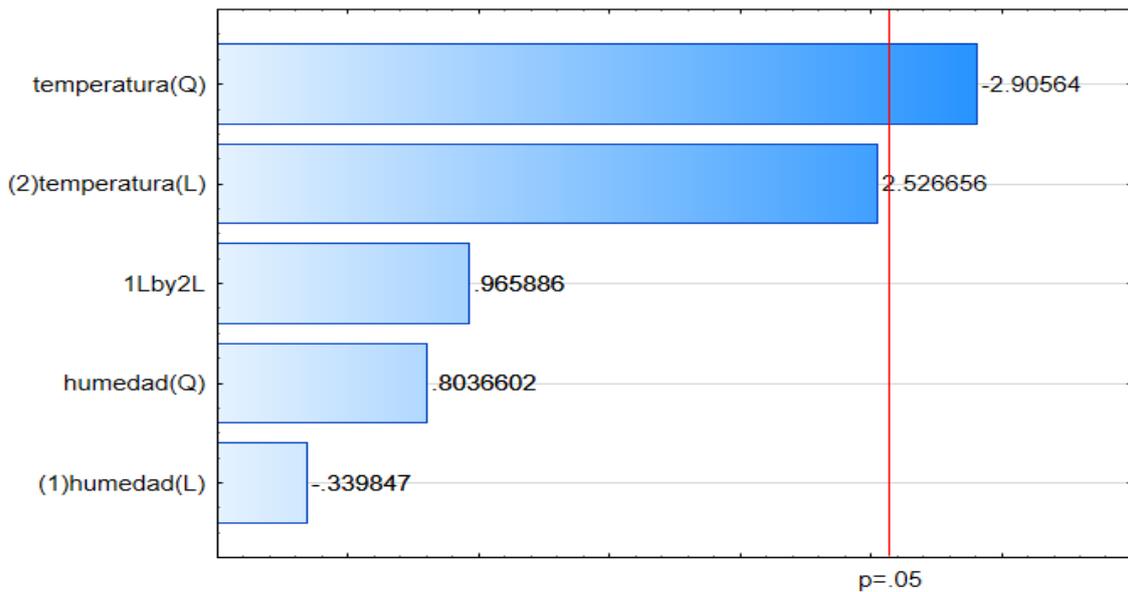
**Tabla 12.** Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple de las propiedades funcionales de las dietas extrudidas.

Coeficientes	Dieta con piña			Dieta control		
	IAA	ISA	pH	IAA	ISA	pH
Intercepto	3.8	13.87	5.58	3.96	7.41	6.18
A-Humedad	-0.016	0.019	-4.28	0.11	-0.22	-0.003
B-Temperatura	0.12	-0.29	<b>0.035</b>	<b>0.31</b>	<b>-0.66</b>	<b>0.041</b>
A <sup>2</sup>	0.045	0.21	-0.022	0.11	-0.29	0.008
B <sup>2</sup>	<b>-0.16</b>	<b>-0.75</b>	-3.12	0.032	0.17	-0.003
AB	0.065	<b>-0.67</b>	-0.026	-0.088	-0.43	0.013
R <sup>2</sup>	0.79	0.89	0.72	0.86	0.84	0.78
P model	0.08	0.2846	0.15	0.03	0.04	0.0001
Lack of Fit	0.13	0.91	0.14	0.00	0.21	0.0001

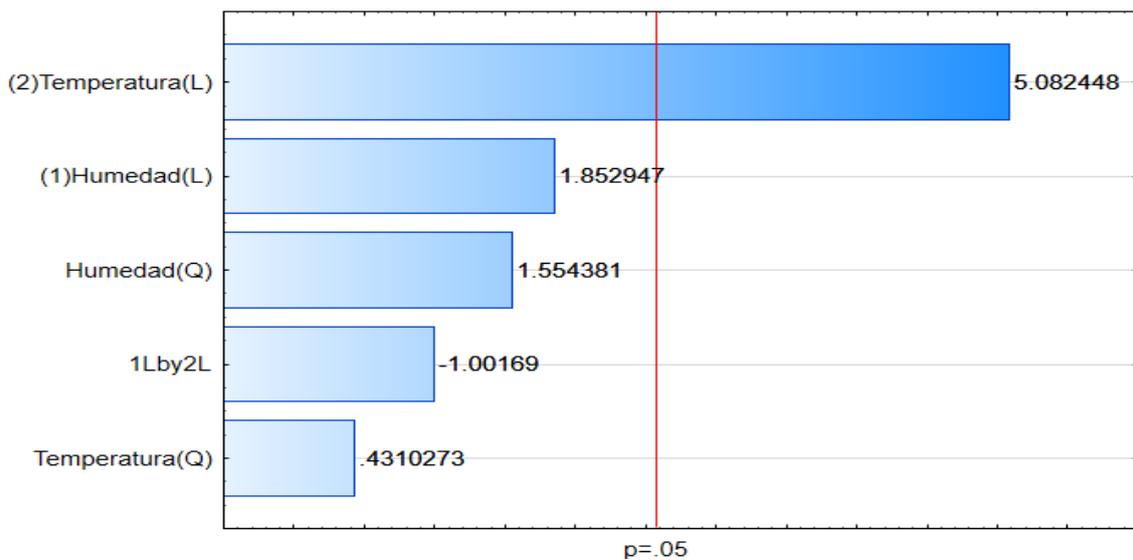
Nota: Los números en negrita indican estimaciones de parámetros significativos ( $P < 0.05$ )  
 Abreviaturas: IAA = índice de absorción de agua; ISA = índice de solubilidad en agua.

El IAA mide la cantidad de agua absorbida por el almidón y se puede utilizar como índice de gelatinización (Anderson et al., 1969). Los valores presentados de IAA en los extrudidos DP fueron menores a los obtenidos en los extrudidos DC, esto pudiera deberse a los azúcares presentes en los extrudidos DP los cuales a altas temperaturas de extrusión pueden llegar a causar una caramelización, produciendo una disminución de agua disponible para que el almidón pueda llegar a tener una gelatinización, otro factor que pudiera aumentar el IAA en los extrudidos DC es el contenido de proteínas ya que la alfalfa contiene un mayor porcentaje de proteínas en comparación del polvo de los residuos de piña, estas proteínas a temperaturas altas de extrusión llegan a una desnaturalización lo cual libera radicales con afinidad al agua lo cual aumenta el IAA. Pensamiento-Niño et al. (2018) menciona que el IAA está asociado con

el balance hidrofílico de las proteínas presentes en la mezcla, el cual cambia en función del grado de desnaturalización de las proteínas, por lo que el proceso de extrusión modifica el índice de solubilidad de las proteínas. Amaya-Llano et al. (2007) mencionan que una combinación de alta temperatura y alto contenido de humedad hace que los valores de IAA aumentaran después de la extrusión, mientras que las altas velocidades del tornillo no favorecen la absorción de agua.



**Figura 16.** Diagrama de Pareto del índice de absorción de agua de los extrudidos DP.

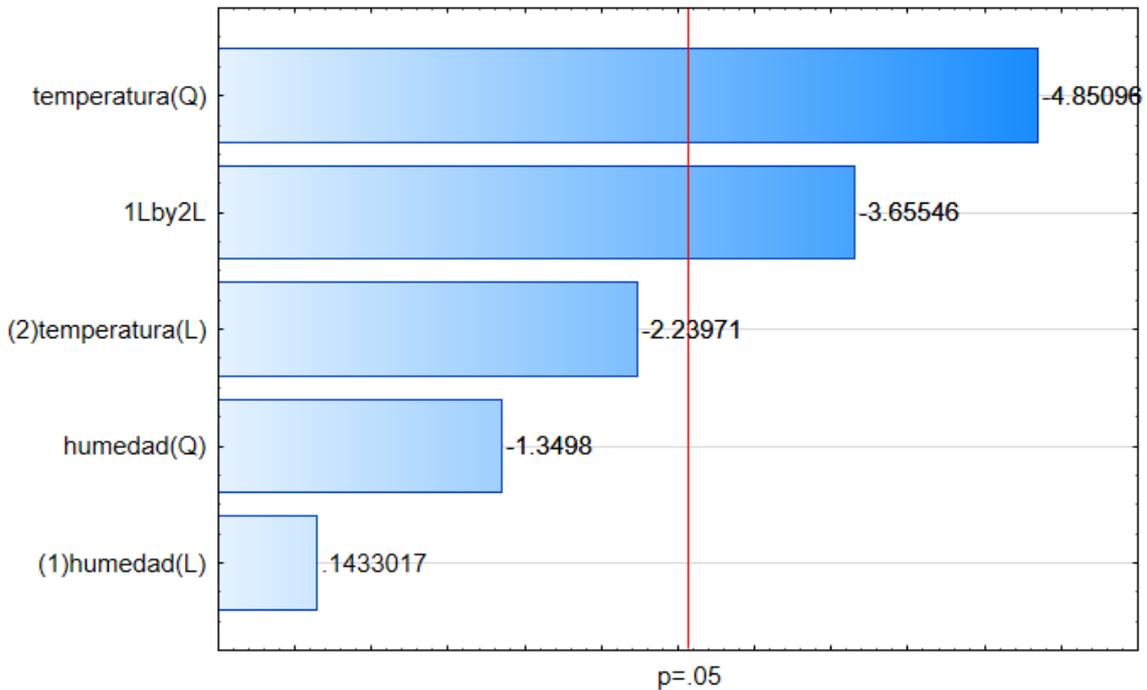


**Figura 17.** Diagrama de Pareto del índice de absorción de agua de los extrudidos DC.

Por otra parte, Reyes-Jáquez et al. (2011) menciona que valores bajos de índice de absorción de agua obtenidos a bajas temperaturas indican una disponibilidad de agua restringida para el gránulo de almidón, debido a una estructura más compacta. Sin embargo, cuando la temperatura aumenta, las cadenas de amilosa y amilopectina forman una matriz expandible que se traduce en una mayor capacidad de retención de agua. La alta tasa de corte, la disponibilidad de polímeros intactos reduce. Por lo tanto, hay menos disponibilidad de grupos hidrofílicos capaces de unirse con moléculas de agua. Por lo tanto, se observan valores más bajos de índice de absorción de agua a mayor velocidad del tornillo de extrusión (Singha et al. 2018). IAA disminuyó con el aumento en el contenido de humedad, lo que podría atribuirse a la reducción de la elasticidad de la masa a través de la plastificación de la masa fundida con mayor contenido de humedad (Samy et al., 2018). Swati et al. (2021) mencionan que los valores del índice de absorción de agua se redujeron con el aumento del nivel de polvo de jamun en la mezcla de alimentación, Por lo tanto, las muestras de control tienen valores IAA más altos en comparación con las muestras suplementadas debido a su mayor contenido de almidón, ya que parte del almidón ha sido reemplazado por polvo de jamun en las muestras suplementadas lo cual indica que al aumentar el contenido de azúcares en los extrudidos disminuye el IAA. Las variaciones que existen en el IAA pueden ser causadas por el descubrimiento de grupos hidrofílicos en los extrudidos y mayor disponibilidad y más fácil penetración de estructuras por moléculas de agua (Yagci et al., 2022).

Los valores de ISA en los extrudidos DP fueron de 11.59 a 14.07%. El tratamiento 7 fue el que presentó menor ISA, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 19% y temperatura de 156.21 °C. Por otro lado el tratamiento 5 fue el que presentó mayor IAA, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 19% y temperatura de 135 °C. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de ISA mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.89$  como se observa en la Tabla 12, el modelo de regresión no fue significativo ( $p > 0.05$ ). En este caso la interacción de la temperatura y la humedad, así como el cuadrático de la temperatura

presentaron un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) negativo en el ISA como se puede observar en la Figura 18.

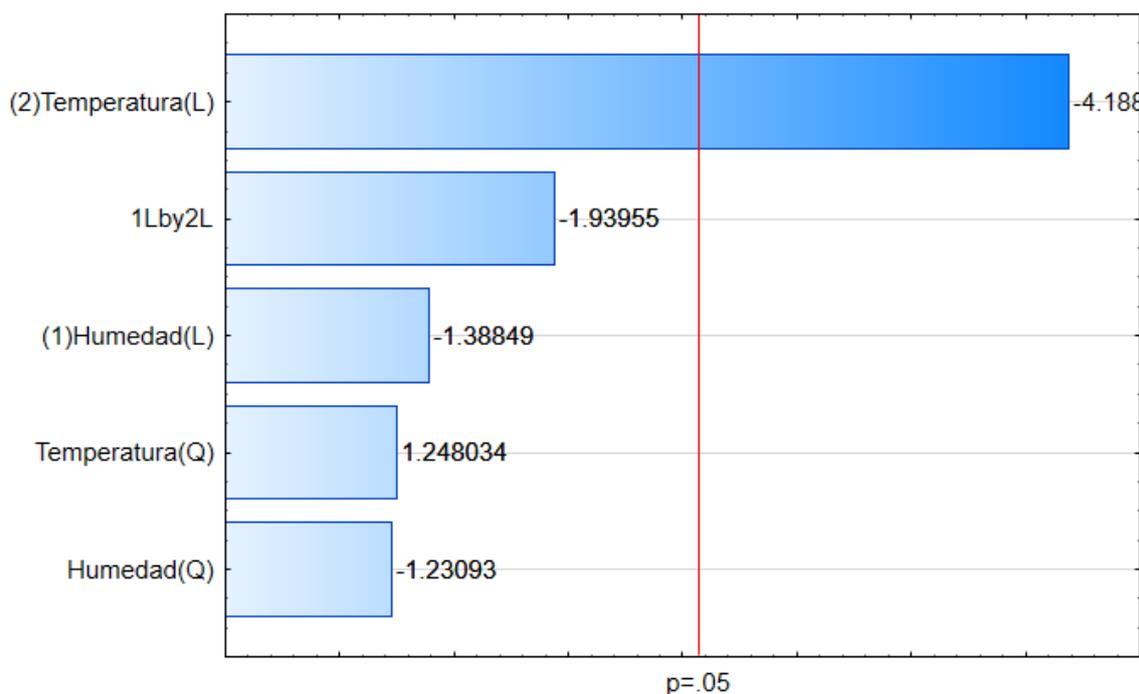


**Figura 18.** Diagrama de Pareto del índice de solubilidad en agua de los extrudidos DP.

Los valores de Índice de solubilidad en agua (ISA) en los extrudidos DC fueron de 6.05 a 11.31%. El tratamiento 11 fue el que presentó menor ISA, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 22.24% y temperatura de 135 °C. Por otro lado, el tratamiento 4 fue el que presentó mayor IAA, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 22% y temperatura de 120 °C. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de ISA mostró un valor de coeficiente de determinación  $R^2 = 0.84$  como se observa en la Tabla 12, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ). En este caso la temperatura presentó un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) negativo en el ISA como se puede observar en la Figura 19.

Debido al proceso de extrusión, hay cambios en el físico y naturaleza química de los ingredientes del alimento que comprenden proteína, almidón y fibra. El componente soluble que se libera del almidón. después de la extrusión se puede

medir y se denomina índice de solubilidad en agua, el cual a menudo se utiliza como indicador de degradación de componentes moleculares (Ding et al., 2006).



**Figura 19.** Diagrama de Pareto del índice de solubilidad en agua de los extrudidos DC.

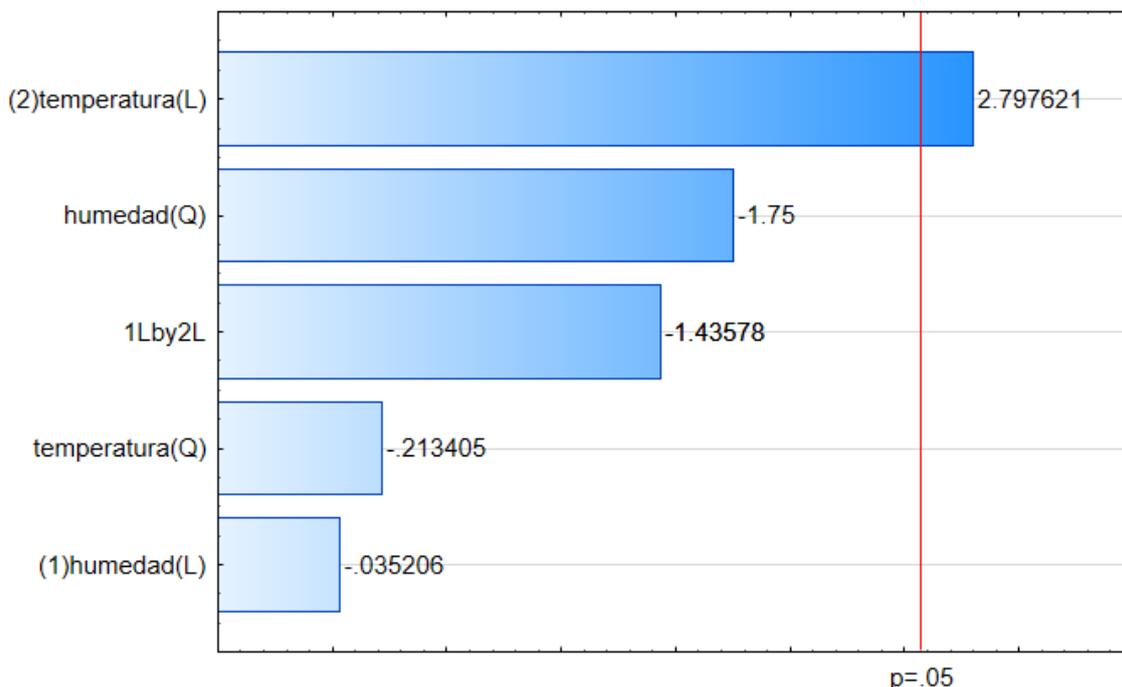
Existen diferencias en los valores de ISA entre las dietas extrudidas, ya que se puede observar en la Tabla 11, existen mayores porcentajes de ISA en los extrudidos DP, esto pudiera deberse a que durante el proceso de extrusión se produce una disminución de la solubilidad de la proteína debido al proceso de desnaturalización que ocurre en las temperaturas de extrusión, esto causando cambios estructurales, los cuales permiten que grupos hidrofílicos OH, NH<sub>2</sub>, COO, formen enlaces cruzados con el almidón, es por esto que se obtienen valores bajos en la dieta control ya que la alfalfa aporta un mayor contenido de proteínas en los extrudidos DC. Por otra parte, Yağcı y Göğüş. (2008) mencionan que el aumento del ISA que se encuentra en los productos extruidos puede estar relacionado con los componentes de menor peso molecular, que se pueden separar con bastante facilidad entre sí cuando las condiciones de procesamiento son más severas, las moléculas de fibra interrumpen la estructura continua de la

masa fundida en la extrusora, lo que impide la deformación elástica durante la extrusión (Moraru y Kokini, 2003). Por lo tanto, los valores más altos de ISA pueden deberse a la desintegración de los gránulos de almidón y los compuestos de bajo peso molecular de la masa fundida extruida durante el proceso de extrusión, lo que puede causar un aumento en el material soluble en los productos extrudidos. En los extrudidos DC se mostró que al aumentar el contenido de humedad ISA disminuía esto pudiera atribuirse a la reducción de la elasticidad de la masa a través de la plastificación de la masa fundida con mayor contenido de humedad (Ding et al. 2006). Por otra parte, esta disminución también podría atribuirse a la degradación del almidón y la descomposición de la fibra soluble, a una alta entrada de energía de extrusión debido al bajo contenido de humedad. En la mayoría de los casos, ISA disminuye con el aumento del contenido de subproductos ricos en fibra (Dey et al., 2021).

El ISA se eleva debido a la desintegración de los gránulos de almidón y de bajo peso molecular compuestos de extruido fundido durante el proceso de extrusión, esto puede causar un aumento en material soluble. Esta tendencia se puede observar en la Tabla 11 en el caso de los extrudidos DP. Esto significa que índice de solubilidad en agua disminuye como el porcentaje de fibra aumenta estos resultados son similares a los informados por Jin et al. (1995), quien observó una disminución en ISA de los extruidos de harina de maíz a medida que el contenido de fibra aumentaba de 0 al 20%. La razón de esto pudiera deberse a que la solubilidad en agua da información sobre la degradación. Se han observado diferentes resultados para el efecto de la incorporación de subproductos alimentarios sobre la funcionalidad de los extruidos (Medina-Rendon et al., 2021). Otra tendencia similar fue presentada por Igual et al. (2021) donde mencionan que el aumento del porcentaje de alfalfa en extrudidos, que contiene una gran cantidad de fibra disminuyó el contenido de almidón, lo cual mejoro los valores de IAA y disminuyeron los valores de ISA.

Los valores del pH se observan en la Tabla 11, de los extrudidos DP fueron de 5.49 a 5.65. El tratamiento 1 fue el que presento menor pH, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 16% y temperatura de 120 °C. por otro lado el tratamiento 7 fue el que presento mayor pH, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 19% y temperatura de 156.21 °C.

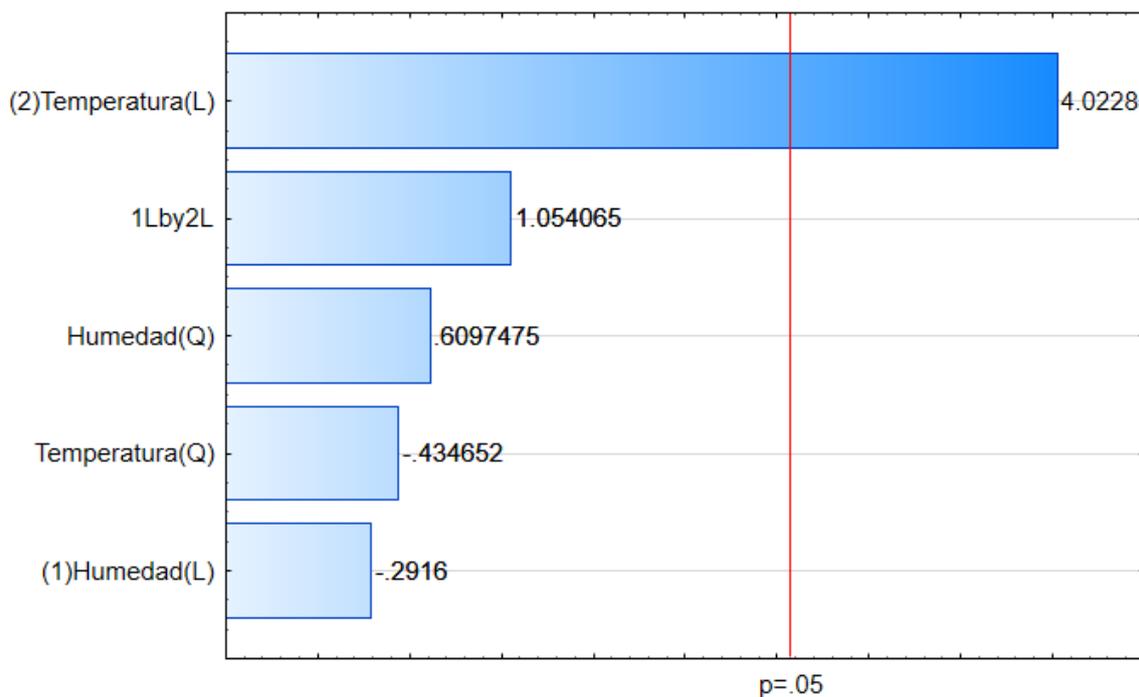
El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de pH mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.72$  como se observa en la Tabla 12, el modelo de regresión no fue significativo ( $p > 0.05$ ). En este caso la temperatura presento un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) positivo en el pH como se puede observar en la Figura 20.



**Figura 20.** Diagrama de Pareto del pH de los extrudidos DP.

Por otra parte, los valores del pH, de los extrudidos DC fueron de 6.09 a 6.23. El tratamiento 8 fue el que presento menor pH, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 19% y temperatura de 113.79 °C. por otro lado el tratamiento 6 fue el que presento mayor pH, de acuerdo con las siguientes condiciones: contenido de humedad 16% y temperatura de 150 °C. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de pH mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.78$  como se observa en la Tabla 12, el modelo de regresión no fue significativo ( $p > 0.05$ ). En este caso la temperatura presento un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) positivo en el pH de los extrudidos DC como se puede observar en la Figura 21. Como se observa los valores del pH de los extrudidos DP fueron relativamente bajos en comparación de los resultados obtenidos de los extrudidos DC, donde a las altas temperaturas en el caso de los

extrudidos DP se obtuvieron valores bajos de pH, esto en ambas dieta, esto pudiera deberse a los residuos agroindustriales de piña en el caso de los extrudidos DP ya que a las altas temperaturas se pueden liberar ciertos ácidos grasos los cuales provocan que se obtengan productos extrudidos con un menos pH esta misma tendencia fue presentada por Pensamiento-Niño et al. (2018), donde mencionan que la disminución del pH en productos extrudidos, puede deberse a que el aumento de los valores de contenido de humedad y altas temperaturas durante el proceso de extrusión ayuda a liberar algunos ácidos orgánicos (por ejemplo, ácidos grasos) presentes, lo cual lleva a un pH bajo valores (más ácidos) de las muestras.



**Figura 21.** Diagrama de Pareto del pH de los extrudidos DC.

Bowen et al. (2006) reportaron que la presencia de ácidos grasos libres puede causar cambios en el pH del sistema y resultar en la hidrólisis del almidón. Costa et al. (2007) encontraron 2.53 y 2.98% de ácido cítrico en cáscara de piña y orujo de piña, respectivamente, valores inferiores a los reportados aquí. A medida que la mayoría de las frutas maduran, la acidez disminuye y el contenido de azúcar aumenta. Por lo tanto, las diferencias entre los valores de acidez pueden deberse a variaciones en la madurez de la fruta y/o diferencias en las variedades de piña,

en este caso también puede deberse a los componentes os cuales integran las dietas.

## 7.7 COLOR DE LAS DIETAS EXTRUDIDAS

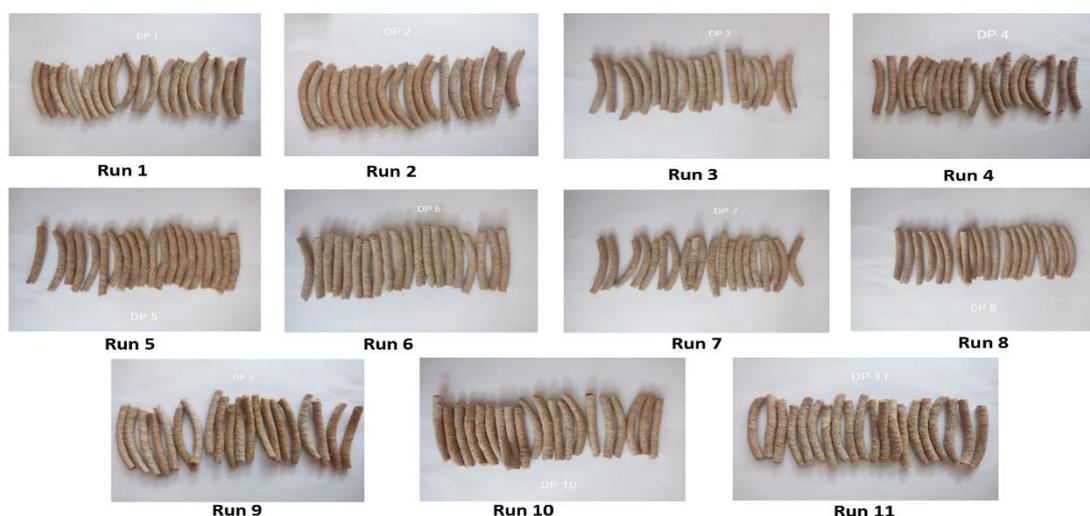
Los resultados del análisis de color se muestran en las tablas 13 y 14, indica que los valores de  $L^*$  para DP varían de 75.06 a 74.37,  $a^*$  de 3.92 a 5.38,  $b^*$  de 17.93 a 19.40,  $C^*$  de 18.56 a 20.13,  $h^\circ$  1.28 a 1.36 y  $\Delta E$  varió de 11.87 a 16.38. En la figura 22, se observa la apariencia visual de las botanas extrudidas.

**Tabla 13.** Análisis de color de los extrudidos Dieta con piña.

Tr	H (%)	Tem (°C)	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$	$\Delta E$
1	16	120	72.98±0.57 <sup>df</sup>	4.16±0.18 <sup>ac</sup>	18.72±0.29 <sup>a</sup>	19.17±0.32 <sup>a</sup>	1.35±0.01 <sup>c</sup>	12.54±0.41 <sup>ade</sup>
2	19	135	67.01±2.67 <sup>bc</sup>	4.45±0.07 <sup>abd</sup>	18.96±1.27 <sup>a</sup>	17.51±1.25 <sup>b</sup>	1.31±0.01 <sup>ab</sup>	14.78±0.81 <sup>bc</sup>
3	14.76	135	70.54±0.38 <sup>ad</sup>	4.28±0.17 <sup>acd</sup>	18.07±0.13 <sup>ab</sup>	18.56±0.15 <sup>ab</sup>	1.33±0.01 <sup>bc</sup>	13.34±0.47 <sup>a</sup>
4	22	120	74.37±0.07 <sup>f</sup>	3.92±0.12 <sup>c</sup>	18.68±0.04 <sup>a</sup>	19.08±0.06 <sup>a</sup>	1.36±0.01 <sup>e</sup>	11.87±0.33 <sup>d</sup>
5	19	135	69.15±1.40 <sup>ab</sup>	4.45±0.01 <sup>abd</sup>	16.94±0.53 <sup>a</sup>	19.47±0.52 <sup>a</sup>	1.34±0.02 <sup>cd</sup>	13.21±0.36 <sup>ae</sup>
6	16	150	68.06±0.18 <sup>abc</sup>	4.79±0.23 <sup>b</sup>	18.17±0.04 <sup>ab</sup>	18.79±0.10 <sup>ab</sup>	1.31±0.01 <sup>ab</sup>	14.76±0.65 <sup>bc</sup>
7	19	156.21	65.06±3.05 <sup>c</sup>	5.26±0.28 <sup>f</sup>	17.93±1.25 <sup>ab</sup>	18.68±1.29 <sup>ab</sup>	1.28±0.00 <sup>g</sup>	16.38±0.26 <sup>f</sup>
8	19	113.79	74.12±0.06 <sup>f</sup>	4.03±0.15 <sup>ac</sup>	18.94±0.12 <sup>a</sup>	19.37±0.09 <sup>a</sup>	1.36±0.03 <sup>de</sup>	12.01±0.51 <sup>de</sup>
9	22	150	69.28±0.12 <sup>ab</sup>	5.38±0.29 <sup>f</sup>	19.40±0.29 <sup>a</sup>	20.13±0.35 <sup>a</sup>	1.30±0.01 <sup>ag</sup>	15.49±0.62 <sup>cf</sup>
10	19	135	67.16±1.68 <sup>abc</sup>	4.78±0.13 <sup>b</sup>	18.20±0.77 <sup>ab</sup>	18.82±0.75 <sup>ab</sup>	1.31±0.01 <sup>ab</sup>	14.75±0.70 <sup>bc</sup>
11	23.24	135	70.62±0.43 <sup>ad</sup>	4.64±0.07 <sup>bd</sup>	19.35±0.45 <sup>a</sup>	19.89±0.44 <sup>a</sup>	1.33±0.06 <sup>c</sup>	13.50±0.39 <sup>ab</sup>

Los valores son la media ± desviación estándar (n = mínimo tres réplicas); los valores que no comparten una letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).

El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales del análisis de color  $L^*$  mostró un valor de coeficiente de determinación  $R^2 = 0.92$  y para  $\Delta E$  mostro un valor de coeficiente de determinación  $R^2 = 0.92$ , como se observa en la Tabla 15, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ).



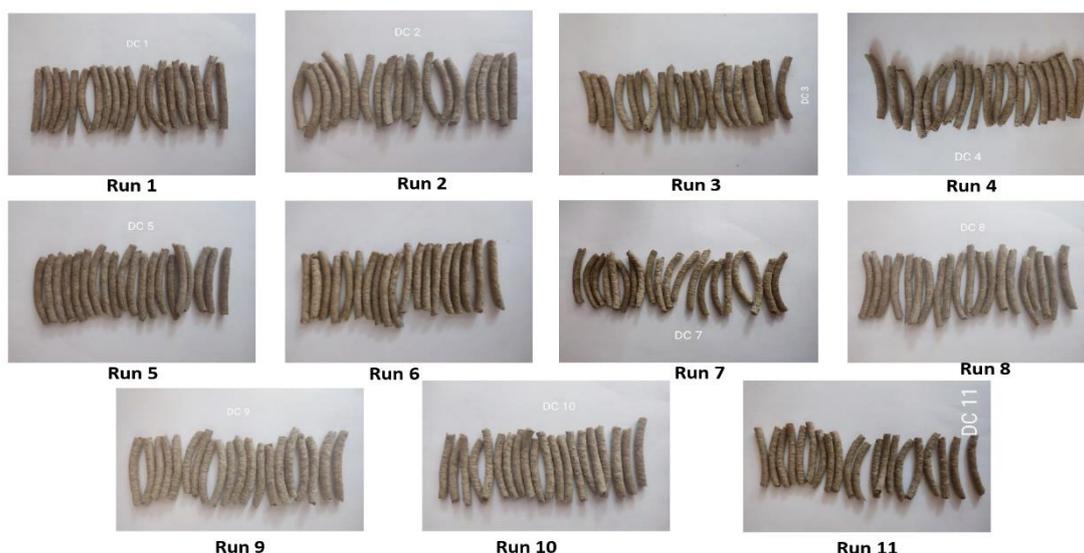
**Figura 22.** Fotografía de extrudidos de la dieta con polvo de cáscara de piña (DP).

En este caso la temperatura presento un efecto significativo ( $P < 0.05$ ) negativo en  $L^*$  como se puede observar en la Figura 24. En el caso de la  $\Delta E$  la temperatura tuvo un efecto significativo ( $P < 0.05$ ) positivo, como se puede observar en la Figura 25. Los resultados del análisis de color de los extrudidos DC se muestran en las tablas 13 y 14, indica que los valores de  $L^*$  para DP varían de 63.16 a 70.35,  $a^*$  de 1.70 a 2.41,  $b^*$  de 13.72 a 15.85,  $C^*$  de 12.02 a 16.02,  $h^\circ$  de 1.40 a 1.44 y  $\Delta E$  varió de 7.06 a 9.01. En la figura 23, se observa la apariencia visual de las botanas extrudidas.

**Tabla 14.** Análisis de color de los extrudidos DC.

Tr	H (%)	Tem (°C)	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$	$\Delta E$
1	16	120	66.29±1.19 <sup>ab</sup>	1.70±0.19 <sup>b</sup>	13.75±0.39 <sup>a</sup>	13.85±0.41 <sup>a</sup>	1.44±0.01 <sup>b</sup>	7.06±0.59 <sup>b</sup>
2	19	135	63.66±0.08 <sup>c</sup>	2.41±0.05 <sup>a</sup>	14.01±0.10 <sup>ac</sup>	14.21±0.11 <sup>abd</sup>	1.40±0.00 <sup>c</sup>	8.37±0.17 <sup>a</sup>
3	14.76	135	66.48±0.60 <sup>ab</sup>	2.34±0.009 <sup>a</sup>	15.02±0.08 <sup>bd</sup>	15.20±0.08 <sup>bce</sup>	1.41±0.01 <sup>ac</sup>	8.96±0.02 <sup>a</sup>
4	22	120	67.90±0.98 <sup>a</sup>	2.08±0.10 <sup>abc</sup>	14.60±0.36 <sup>abc</sup>	14.75±0.37 <sup>abcd</sup>	1.42±0.03 <sup>ab</sup>	8.12±0.20 <sup>ab</sup>
5	19	135	67.53±0.10 <sup>a</sup>	2.33±0.07 <sup>a</sup>	15.85±0.08 <sup>d</sup>	16.02±0.07 <sup>e</sup>	1.42±0.05 <sup>ab</sup>	8.37±0.31 <sup>a</sup>
6	16	150	64.69±1.10 <sup>bc</sup>	2.30±0.15 <sup>ac</sup>	14.51±0.18 <sup>abc</sup>	14.69±0.19 <sup>abcd</sup>	1.41±0.00 <sup>ac</sup>	9.01±0.54 <sup>a</sup>
7	19	156.2	63.16±2.18 <sup>c</sup>	1.90±0.36 <sup>bc</sup>	13.72±1.10 <sup>a</sup>	13.85±1.13 <sup>a</sup>	1.43±0.01 <sup>ab</sup>	7.83±0.99 <sup>ab</sup>
8	19	113.8	70.35±0.10 <sup>d</sup>	1.73±0.005 <sup>b</sup>	13.91±0.00 <sup>ac</sup>	12.02±0.00 <sup>ad</sup>	1.44±0.03 <sup>b</sup>	7.11±0.01 <sup>b</sup>
9	22	150	66.84±0.10 <sup>ab</sup>	2.36±0.27 <sup>a</sup>	15.00±0.16 <sup>bd</sup>	15.18±0.19 <sup>bce</sup>	1.41±0.01 <sup>ac</sup>	8.93±0.94 <sup>a</sup>
10	19	135	67.46±0.13 <sup>a</sup>	2.12±0.20 <sup>abc</sup>	15.45±0.10 <sup>bd</sup>	15.59±0.10 <sup>ce</sup>	1.43±0.01 <sup>ab</sup>	8.77±0.72 <sup>a</sup>
11	23.243	135	66.03±0.17 <sup>ab</sup>	2.29±0.10 <sup>ac</sup>	14.80±0.25 <sup>bc</sup>	14.98±0.25 <sup>bcd</sup>	1.41±0.00 <sup>ac</sup>	8.79±0.35 <sup>a</sup>

Los valores son la media ± desviación estándar (n = mínimo tres réplicas); los valores que no comparten una letra son significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ).



**Figura 23.** Fotografía de extrudidos de la dieta control (DC).

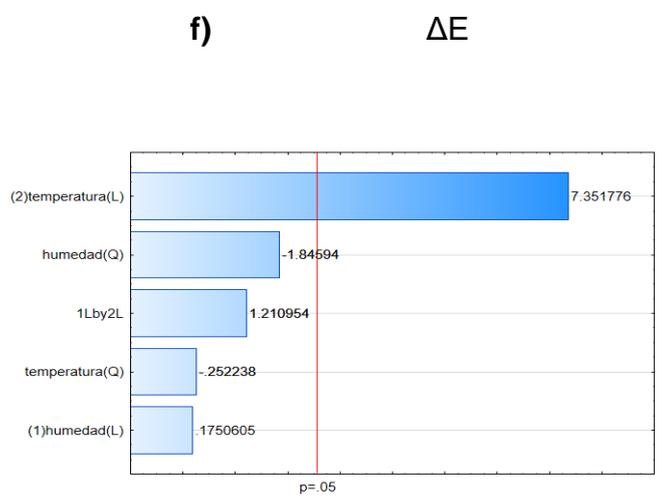
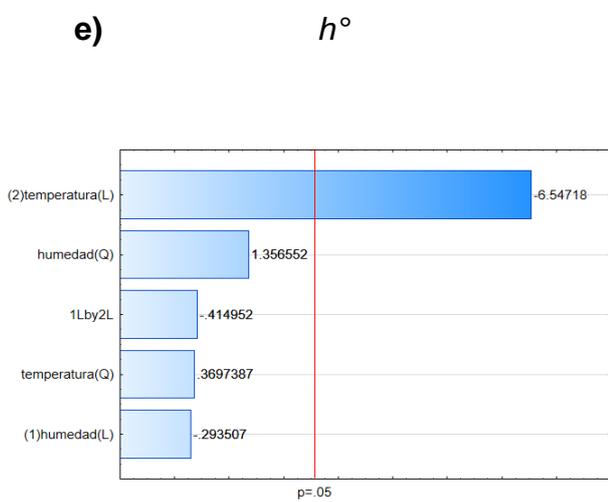
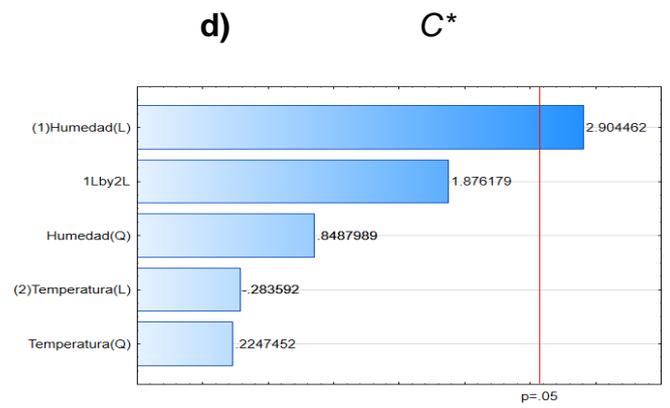
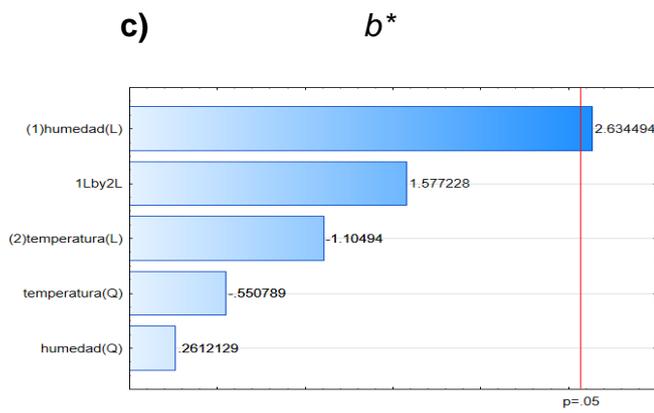
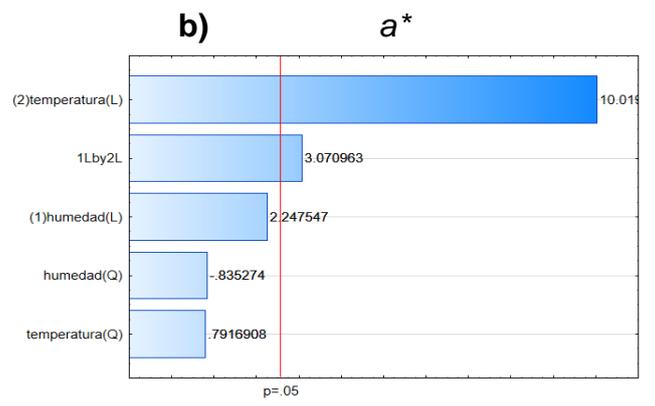
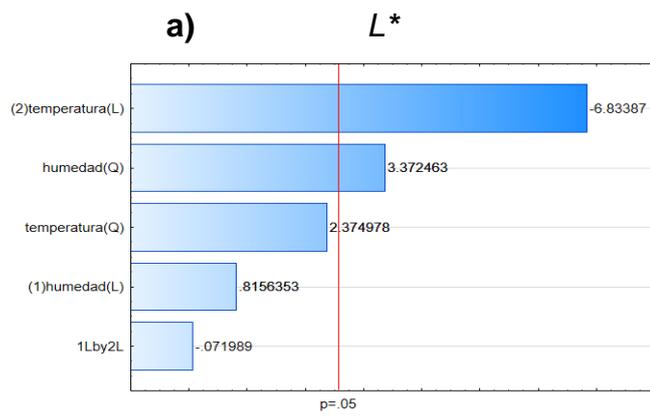
El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales del análisis de color de los extrudidos DC  $L^*$  mostró un valor de coeficiente de determinación  $R^2 = 0.72$  y para  $\Delta E$  mostró un valor de coeficiente de determinación  $R^2 = 0.86$ , como se observa en la Tabla 15, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ). En este caso la temperatura presentó un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) negativo en  $L^*$  como se puede observar en la Figura 24. En el caso de la  $\Delta E$  la temperatura tuvo un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) positivo, como se puede observar en la Figura 26.

**Tabla 15.** Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple de color de extrudidos con polvo de piña y dieta control.

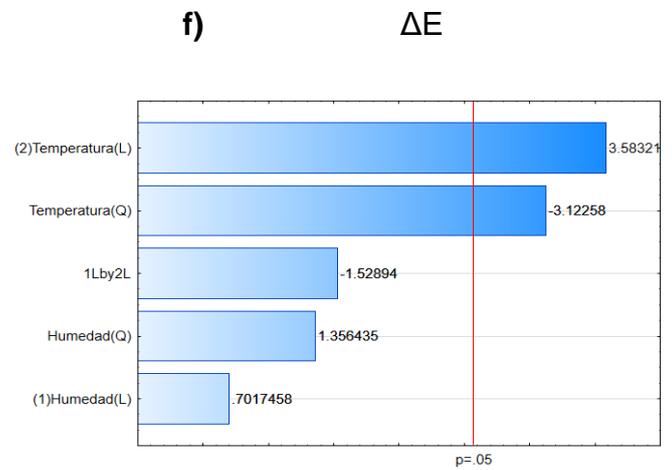
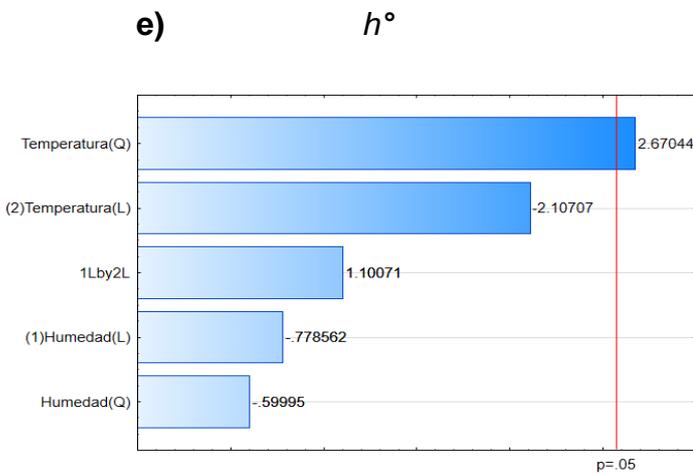
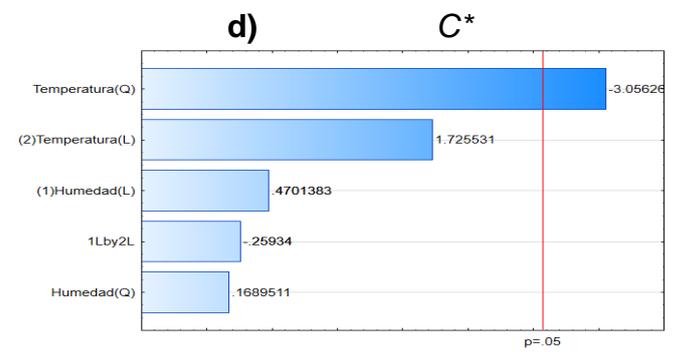
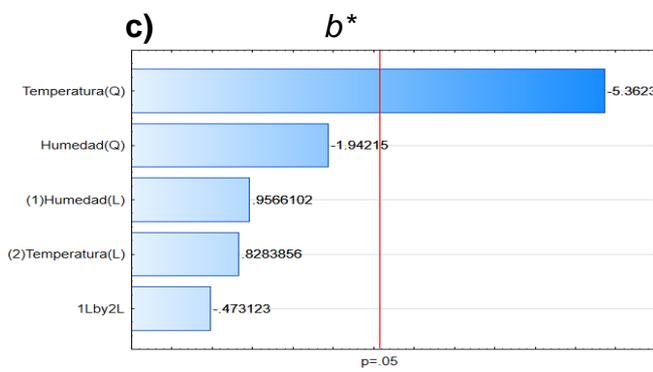
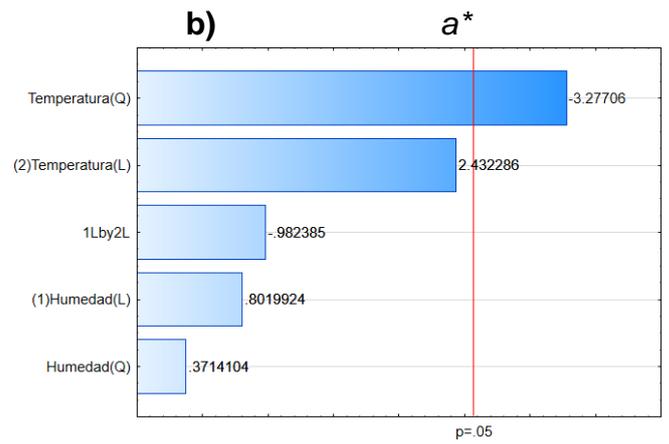
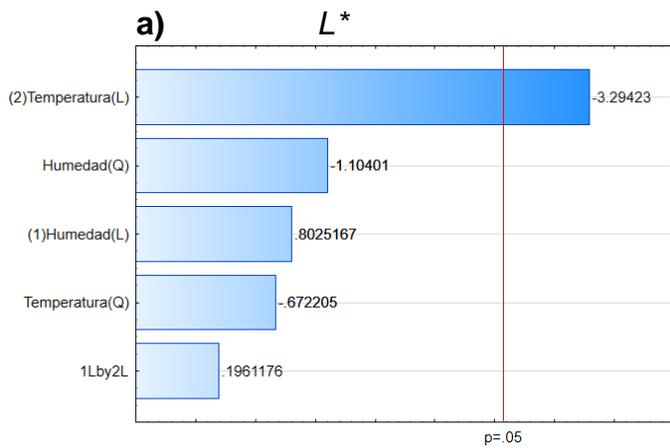
Coeficientes	Dieta con piña						Dieta control					
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$	$\Delta E$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$	$\Delta E$
Intercepto	67.77	4.56	18.7	19.04	1.32	14.25	67.5	2.29	15.1	15.27	1.41	8.5
A-Humedad	0.34	0.11	<b>0.38</b>	<b>0.39</b>	0	0.036	0.39	0.05	0.13	0.13	-2.50E <sup>03</sup>	0.092
B-Temperatura	<b>-2.85</b>	<b>0.48</b>	-0.16	-0.038	<b>-0.03</b>	<b>1.5</b>	<b>-1.6</b>	0.14	0.11	0.48	-6.77E <sup>03</sup>	<b>0.47</b>
A <sup>2</sup>	<b>1.68</b>	-0.027	0.04	0.14	0.01	-0.45	-0.64	0.03	-0.31	0.056	-2.29E <sup>03</sup>	0.21
B <sup>2</sup>	1.18	0.029	-0.09	0.03	0	-0.061	-0.39	<b>-0.22</b>	<b>-0.86</b>	<b>-1.02</b>	<b>0.01</b>	<b>-0.49</b>
AB	-0.04	<b>0.25</b>	0.32	0.36	-0.003	0.35	0.13	-0.08	-0.09	-0.1	5.00E <sup>03</sup>	-0.28
R <sup>2</sup>	0.924	0.95	0.69	0.716	0.89	0.922	0.72	0.8	0.86	0.73	0.75	0.86
P model	0.008	1E-04	0.19	0.56	0.0154	0.009	0.016	0.07	0.03	0.144	0.2427	0.276
Lack of Fit	0.54	0.8	0.61	0.52	0.92	0.99	4E-04	0.46	0.21	0.72	0.8836	0.89

Nota: Los números en negrita indican estimaciones de parámetros significativos ( $p < 0.05$ ).

Los valores de luminosidad fueron menores 63.16 a 70.35, en comparación con la dieta DP 75.06 a 74.37, esto pudiera deberse al contenido de alfalfa en el caso de la dieta control ya que esta es de un color oscuro en comparación con el polvo de residuos de piña, por otro lado, el contenido de proteínas es mayor en los extruidos DC los cuales a altas temperaturas provocan una reacción de Millard provocando un oscurecimiento en los extruidos. Las condiciones de procesamiento durante la extrusión favorecen el pardeamiento no enzimático por reacciones de Maillard entre proteínas y azúcares reductores Kannadhasan et al. (2009). Por otra parte, Rivera-Miron et al. (2020). Menciona que los cambios en el color de los productos extruidos se deben al aumento en las concentraciones de SWP y las condiciones de procesamiento (temperatura y contenido de humedad). Alam et al. (2016) reportaron que la adición de fibra de diferentes fuentes puede mostrar un efecto positivo en los valores del cambio de color, en el producto, confirmando una relación positiva entre el cambio de color y la adición de fibra. Ahmed (1999) mencionó que, al aumentar la temperatura del extruido, la adición de fibra podría provocar reacciones de ennegrecimiento. Coutinho et al. (2013) informaron que se presenta una mayor intensidad de color amarillo del producto, durante el proceso de extrusión, ya que se favorece el desarrollo de reacciones no enzimáticas. Resultados similares han sido reportados en la literatura por Yagci y Gogus (2008) y Sacchetti et al. (2004). Los puntajes generales de aceptabilidad de los refrigerios confirmaron que los refrigerios de color claro son preferibles a los más oscuros. El color de los productos extruidos fue afectado por los parámetros del proceso de extrusión y composición química del material procesado. La posible presencia de altas cantidades de azúcares (uno de los principales componentes involucrados en la reacción de Maillard) pueden ser la razón del oscurecimiento y disminución de la homogeneidad del color en los extruidos, particularmente a altas temperaturas afectan los cambios de color (Sharma et al., 2012; Dini et al., 2013).



**Figura 24.** Diagrama de Pareto para los extruidos DP, para los parámetros de color (a)  $L^*$ , b)  $a^*$ , c)  $b^*$ , d)  $C^*$ , e)  $h^\circ$ , f)  $\Delta E$ )



**Figura 25.** Diagrama de Pareto para los extruidos DC, para los parámetros de color (a)  $L^*$ , b)  $a^*$ , c)  $b^*$ , d)  $C^*$ , e)  $h^{\circ}$ , f)  $\Delta E$

## 7.8 GRADO DE GELATINIZACIÓN (GG) DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS

Los resultados presentados en la Tabla 16, muestra los valores del grado de gelatinización para cada tratamiento de los extrudidos DP, cuyos valores están en un intervalo de 0.88 y 5.71%. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales para el grado de gelatinización mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.84$  como se observa en la Tabla 17, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ). El menor grado de gelatinización fue encontrado en el tratamiento 6 (0.88%) bajo las siguientes condiciones: temperatura de 135 °C, contenido de humedad de 23.24%; y el mayor se obtuvo en el Tratamiento 8 (5.71%), bajo las siguientes condiciones: temperatura de 156.21 °C, contenido de humedad de 19%. El contenido de humedad en su término cuadrático y la temperatura en su término lineal presentaron efecto significativo ( $p < 0.05$ ) positivo Tabla 17, la temperatura en su término lineal y cuadrático presentaron efecto significativo ( $p < 0.05$ ) positivo. En la Figura 26, se puede observar que el contenido de humedad y la temperatura fueron las variables que presentaron mayor efecto, de acuerdo con el diagrama de Pareto.

**Tabla 16.** Grado de gelatinización de los extrudidos con polvo de piña y dieta control.

Tr	H %	T °C	Dieta con piña	Dieta control
			Grado de Gelatinización (%)	Grado de Gelatinización (%)
1	16	120	2.84 ± 0.98 <sup>abe</sup>	1.47 ± 0.51 <sup>a</sup>
2	22	120	2.30 ± 0.66 <sup>abe</sup>	1.83 ± 0.23 <sup>ab</sup>
3	16	150	3.60 ± 0.51 <sup>bc</sup>	2.73 ± 0.31 <sup>b</sup>
4	22	150	5.03 ± 0.84 <sup>cd</sup>	2.65 ± 0.12 <sup>b</sup>
5	14.8	135	1.24 ± 0.56 <sup>a</sup>	1.82 ± 0.55 <sup>ab</sup>
6	23.2	135	0.88 ± 0.25 <sup>f</sup>	0.82 ± 0.25 <sup>a</sup>
7	19	113.8	1.30 ± 0.77 <sup>a</sup>	0.81 ± 0.36 <sup>a</sup>
8	19	156.2	5.71 ± 0.80 <sup>d</sup>	2.97 ± 0.61 <sup>b</sup>
9	19	135	4.86 ± 1.24 <sup>cd</sup>	1.93 ± 0.74 <sup>ab</sup>
10	19	135	4.01 ± 0.83 <sup>bcd</sup>	1.21 ± 0.75 <sup>a</sup>
11	19	135	4.01 ± 0.73 <sup>bcd</sup>	1.37 ± 0.28 <sup>a</sup>

Los valores son la media ± desviación estándar (n = mínimo tres réplicas). los valores que no comparten una letra son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ).

Los resultados presentados en la Tabla 16, muestra los valores del grado de gelatinización para cada tratamiento de los extrudidos DC, cuyos valores están en un intervalo de 0.81 y 2.97%. El modelo de regresión ajustado a los resultados

experimentales para el grado de gelatinización, mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.74$  como se observa en la Tabla 17, el modelo de regresión no fue significativo ( $p > 0.05$ ). El menor grado de gelatinización fue encontrado en el tratamiento 7 (0.81%) bajo las siguientes condiciones: temperatura de 113.78 °C, contenido de humedad de 19%; y el mayor se obtuvo en el Tratamiento 8 (2.97%), bajo las siguientes condiciones: temperatura de 156.21 °C, contenido de humedad de 19%. La temperatura en su término lineal presentó efecto significativo ( $p < 0.05$ ) positivo Tabla 17, la temperatura en su término lineal y cuadrático presentaron efecto significativo ( $p < 0.05$ ) positivo. En la Figura 27, se puede observar que la temperatura fue la variable que presentó mayor efecto, de acuerdo con el diagrama de Pareto.

**Tabla 17.** Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple del Grado de gelatinización de los extrudidos.

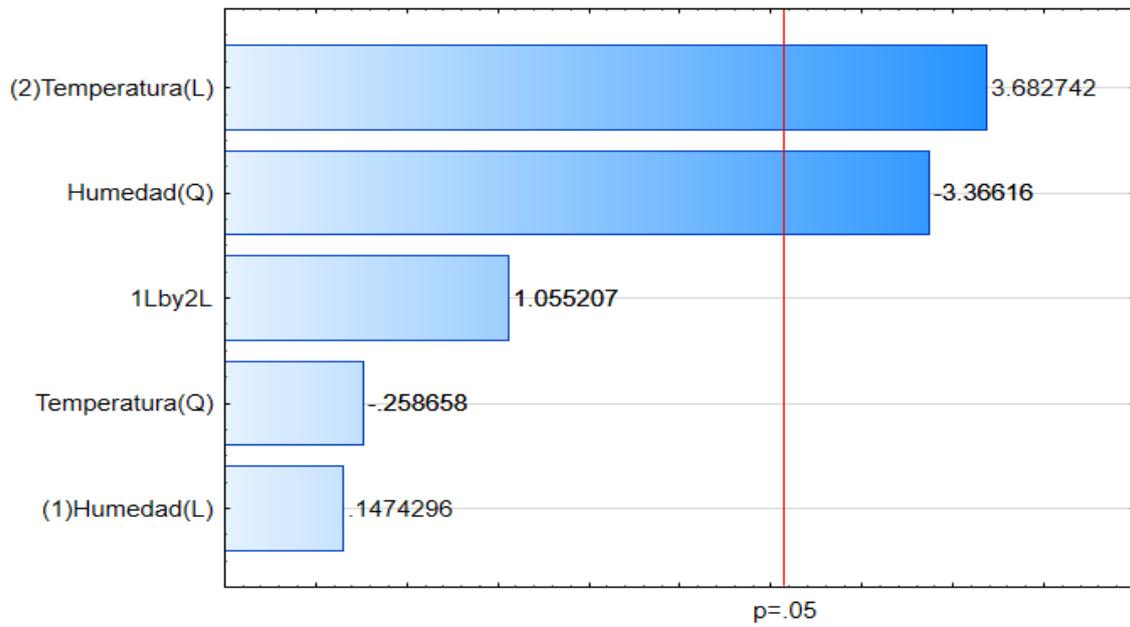
Coeficientes	Dieta con Piña	Dieta control
	Grado de Gelatinización	Grado de Gelatinización
Intercepto	4.29	1.5
A-Humedad	0.049	-0.14
B-Temperatura	<b>1.21</b>	<b>0.64</b>
A <sup>2</sup>	<b>-1.32</b>	0.053
B <sup>2</sup>	-0.1	0.34
AB	0.49	-0.11
R <sup>2</sup>	0.84	0.74
<i>P model</i>	0.04	0.13
Lack of Fit	0.16	0.28

Nota: Los números en negrita indican estimaciones de parámetros significativos ( $p < 0.05$ ).

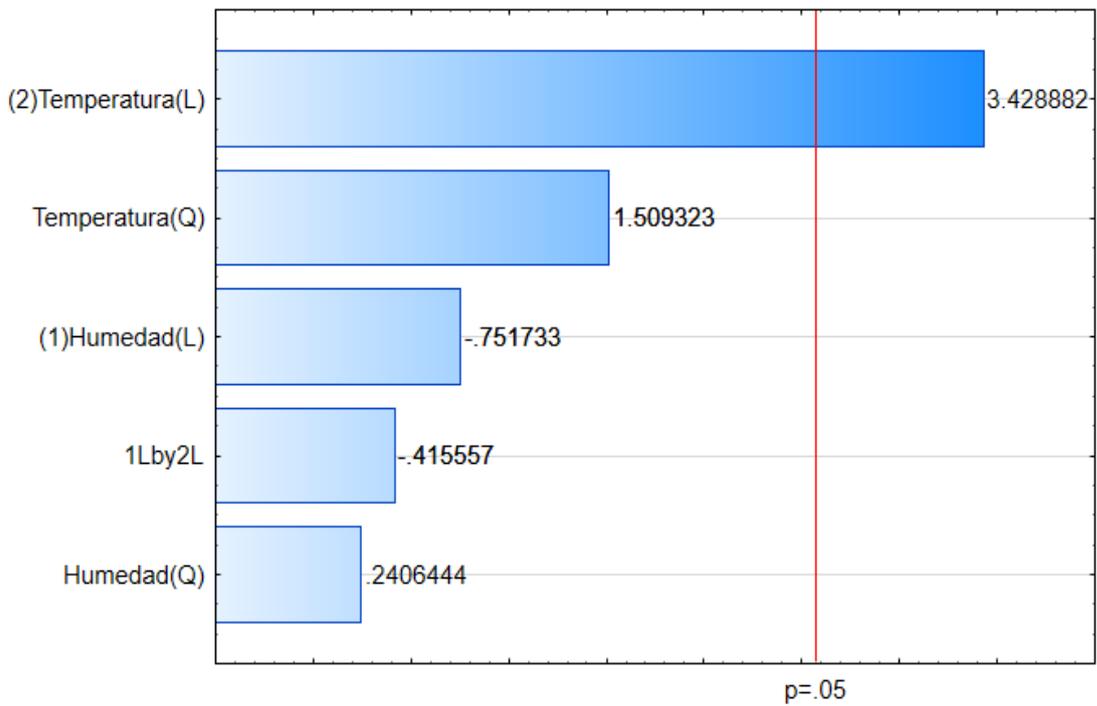
Las altas temperaturas de extrusión tuvieron un efecto significativo positivo en ambas dietas, como se observa en la Figura 26 y 27, ya que al aumentar las temperaturas de extrusión el grado de gelatinización aumento en ambos casos, los valores del grado de gelatinización son mayores en DP en comparación con DC, esto pudiera deberse al contenido de fibra y proteínas existentes en la DC ya que son mayores en comparación con DP, otros factores que intervienen en el grado de gelatinización es el origen del almidón presente en las mezclas, así como también las condiciones de extrusión. Por otra parte, Yang et al. (2020). La gelatinización del almidón generalmente se observa entre 60 y 65 °C. Con el

aumento de la temperatura, el almidón se expande gradualmente y se rompe, ya 95 °C durante 30 min, el almidón puede gelatinizarse por completo.

El almidón se gelatiniza comúnmente calentando en sistemas acuosos, esto resulta en una transición de fase irreversible por hidratación, hinchamiento y solubilización extensas de las moléculas de almidón, lo cual crea un desorden del orden, principalmente por la interrupción de los múltiples niveles de organización granular del gránulo de almidón (Xu et al., 2020). Primordialmente, las elevadas presiones afectan significativamente a la estructura amorfa y ordenada del almidón. Esto pudiese estar relacionado con el limitado hinchamiento de los gránulos de almidón, ya que su estructura granular aún se mantiene. Sin embargo, el tratamiento térmico cambia las propiedades fisicoquímicas del almidón, tales como el aumento de solubilidad en agua y el desarrollo de un comportamiento viscoelástico (Pei-Ling et al., 2010). La solubilidad del almidón es el resultado de la absorción de agua, seguido del hinchamiento del gránulo y del aumento de la temperatura. El índice de solubilidad indica el grado de asociación existente en enlaces intragranulares entre los polímeros del almidón (amilosa y amilopectina) (Araujo et al., 2004). Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, debido a que su estructura está altamente organizada y a que presenta una gran estabilidad por las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes; sin embargo, cuando se calientan empieza un proceso lento de absorción de agua en las zonas intermicelares amorfas, que son las menos organizadas y las más accesibles, ya que los puentes de hidrógeno no son tan numerosos ni rígidos como en las áreas cristalinas (Badui, 2006).



**Figura 26.** Diagrama de Pareto para los extruidos DP del grado de gelatinización.



**Figura 27.** Diagrama de Pareto para los extruidos DC del grado de gelatinización.

## 7.9 ANÁLISIS QUÍMICO PROXIMAL DE LAS DIETAS EXTRUDIDAS

Los resultados del AQP se presentan en la Tabla 18, muestra los valores del AQP para cada tratamiento de los extrudidos DP, cuyos valores de importancia son la proteína y la fibra, los valores de proteína están en un intervalo de 4.38 y 9.11%. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales para proteína mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.85$  como se observa en la Tabla 20, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ). El menor valor de proteína fue encontrado en el tratamiento 6 (4.38%) bajo las siguientes condiciones: temperatura de 150 °C, contenido de humedad de 16%; y el mayor se obtuvo en el Tratamiento 5 (9.11%), bajo las siguientes condiciones: temperatura de 135 °C, contenido de humedad de 19%. Por otra parte, los valores de fibra están en un intervalo de 8.07 - 12.14%. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de fibra mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.84$  como se observa en la Tabla 20, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ). El menor valor de fibra fue encontrado en el tratamiento 10 (8.07%) bajo las siguientes condiciones: temperatura de 135 °C, contenido de humedad de 19%; y el mayor se obtuvo en el Tratamiento 9 (12.14%), bajo las siguientes condiciones: temperatura de 150 °C, contenido de humedad de 22%. La temperatura de extrusión en su término lineal presento efecto significativo ( $p < 0.05$ ) negativo Tabla 20. En la Figura 28, se puede observar que la temperatura fue la variable que presento un mayor efecto en el contenido de proteína, de acuerdo con el diagrama de Pareto.

Los resultados del AQP de la dieta control se presentan en la Tabla 19, muestra los valores del AQP para cada tratamiento de los extrudidos DC, cuyos valores de importancia son la proteína y la fibra, los valores de proteína están en un intervalo de 9.29 - 12.54%. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales para proteína mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.95$  como se observa en la Tabla 20, el modelo de regresión fue significativo ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 18.** Composición Químico (%) proximal de extrudidos DP.

Tr	H (%)	T (°C)	Humedad	Cenizas	Grasas	Proteína	Fibra	ELN
1	16	120	8.76 ± 0.03 <sup>ab</sup>	15.85 ± 0.97 <sup>a</sup>	2.88 ± 0.03 <sup>e</sup>	8.84 ± 0.13 <sup>ab</sup>	8.35 ± 0.82 <sup>a</sup>	55.32 ± 0.22 <sup>b</sup>
2	19	135	8.47 ± 0.11 <sup>ab</sup>	15.89 ± 0.52 <sup>a</sup>	2.10 ± 0.13 <sup>d</sup>	8.35 ± 0.54 <sup>abc</sup>	8.35 ± 0.14 <sup>a</sup>	56.85 ± 0.05 <sup>e</sup>
3	14.76	135	8.37 ± 0.49 <sup>ab</sup>	15.19 ± 0.69 <sup>a</sup>	2.03 ± 0.23 <sup>ad</sup>	7.87 ± 0.24 <sup>acd</sup>	8.76 ± 0.71 <sup>a</sup>	57.79 ± 0.09 <sup>h</sup>
4	22	120	8.87 ± 0.02 <sup>ab</sup>	15.69 ± 0.50 <sup>a</sup>	2.02 ± 0.16 <sup>ad</sup>	6.99 ± 0.35 <sup>e</sup>	8.97 ± 2.79 <sup>a</sup>	57.46 ± 0.45 <sup>g</sup>
5	19	135	8.51 ± 0.02 <sup>ab</sup>	15.20 ± 0.83 <sup>a</sup>	1.71 ± 0.09 <sup>ac</sup>	9.11 ± 0.32 <sup>b</sup>	8.12 ± 1.27 <sup>a</sup>	57.35 ± 0.24 <sup>f</sup>
6	16	150	7.97 ± 0.01 <sup>a</sup>	14.59 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.70 ± 0.01 <sup>ac</sup>	4.38 ± 0.19 <sup>e</sup>	8.79 ± 2.06 <sup>a</sup>	62.56 ± 0.15 <sup>k</sup>
7	19	156.2	9.32 ± 0.42 <sup>b</sup>	15.08 ± 0.43 <sup>a</sup>	1.28 ± 0.01 <sup>b</sup>	4.39 ± 0.13 <sup>e</sup>	10.73 ± 0.96 <sup>a</sup>	59.20 ± 0.14 <sup>j</sup>
8	19	113.8	8.50 ± 0.31 <sup>ab</sup>	15.91 ± 0.54 <sup>a</sup>	1.43 ± 0.16 <sup>bc</sup>	8.81 ± 0.24 <sup>ab</sup>	8.73 ± 0.79 <sup>a</sup>	56.61 ± 0.24 <sup>d</sup>
9	22	150	8.53 ± 0.17 <sup>ab</sup>	15.05 ± 0.25 <sup>a</sup>	1.26 ± 0.07 <sup>b</sup>	8.60 ± 1.04 <sup>abc</sup>	12.14 ± 0.13 <sup>a</sup>	53.01 ± 0.24 <sup>a</sup>
10	19	135	8.07 ± 0.30 <sup>a</sup>	15.90 ± 0.53 <sup>a</sup>	1.67 ± 0.01 <sup>ac</sup>	7.39 ± 0.30 <sup>cd</sup>	8.07 ± 0.83 <sup>a</sup>	58.90 ± 0.12 <sup>i</sup>
11	23.24	135	11.17 ± 0.84 <sup>c</sup>	14.72 ± 0.16 <sup>a</sup>	1.28 ± 0.04 <sup>b</sup>	7.94 ± 0.12 <sup>abcd</sup>	8.77 ± 0.12 <sup>a</sup>	56.12 ± 0.14 <sup>c</sup>

Los valores presentados son el promedio ± desviación estándar, (ELN) extracto libre de nitrógeno. los valores que no comparten una letra son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 19.** Composición Químico (%) proximal de extrudidos Dieta control.

Tr	H (%)	T (°C)	Humedad	Cenizas	Grasas	Proteína	Fibra	ELN
1	16	120	8.66 ± 0.11 <sup>ef</sup>	16.12 ± 0.20 <sup>abc</sup>	1.99 ± 0.20 <sup>abc</sup>	11.58 ± 0.19 <sup>ab</sup>	11.55 ± 1.05 <sup>a</sup>	50.11 ± 0.11 <sup>c</sup>
2	19	135	9.02 ± 0.29 <sup>g</sup>	16.02 ± 0.10 <sup>abc</sup>	1.61 ± 0.05 <sup>ab</sup>	13.84 ± 0.05 <sup>b</sup>	10.18 ± 0.69 <sup>a</sup>	49.38 ± 0.01 <sup>b</sup>
3	14.76	135	8.20 ± 0.71 <sup>de</sup>	15.04 ± 0.13 <sup>a</sup>	2.50 ± 0.39 <sup>bc</sup>	9.85 ± 0.67 <sup>a</sup>	11.43 ± 2.11 <sup>a</sup>	52.98 ± 0.12 <sup>a</sup>
4	22	120	6.46 ± 0.03 <sup>bc</sup>	16.68 ± 0.40 <sup>d</sup>	2.63 ± 0.15 <sup>c</sup>	11.74 ± 0.08 <sup>ab</sup>	11.48 ± 1.37 <sup>a</sup>	51.01 ± 0.45 <sup>d</sup>
5	19	135	5.70 ± 0.10 <sup>a</sup>	15.53 ± 0.01 <sup>abc</sup>	2.51 ± 0.10 <sup>bc</sup>	12.95 ± 0.53 <sup>b</sup>	11.18 ± 0.31 <sup>a</sup>	52.12 ± 0.03 <sup>e</sup>
6	16	150	5.81 ± 0.03 <sup>ab</sup>	16.36 ± 0.03 <sup>cd</sup>	1.53 ± 0.28 <sup>a</sup>	9.72 ± 0.41 <sup>a</sup>	11.71 ± 0.54 <sup>a</sup>	54.88 ± 0.19 <sup>h</sup>
7	19	156.2	6.38 ± 0.04 <sup>abc</sup>	15.16 ± 0.48 <sup>ab</sup>	1.56 ± 0.21 <sup>a</sup>	9.57 ± 1.78 <sup>a</sup>	11.85 ± 0.80 <sup>a</sup>	55.48 ± 0.87 <sup>i</sup>
8	19	113.8	6.84 ± 0.13 <sup>c</sup>	15.96 ± 0.57 <sup>abc</sup>	2.32 ± 0.19 <sup>abc</sup>	11.16 ± 2.25 <sup>ab</sup>	11.41 ± 0.23 <sup>a</sup>	52.30 ± 0.45 <sup>f</sup>
9	22	150	5.87 ± 0.07 <sup>ab</sup>	15.54 ± 0.75 <sup>abc</sup>	2.35 ± 0.55 <sup>abc</sup>	9.29 ± 0.91 <sup>a</sup>	11.71 ± 2.50 <sup>a</sup>	55.23 ± 0.78 <sup>i</sup>
10	19	135	5.86 ± 0.02 <sup>ab</sup>	15.94 ± 0.51 <sup>abc</sup>	1.81 ± 0.58 <sup>abc</sup>	9.74 ± 0.34 <sup>a</sup>	12.15 ± 0.32 <sup>a</sup>	54.49 ± 0.35 <sup>g</sup>
11	23.24	135	7.68 ± 0.09 <sup>d</sup>	15.54 ± 0.65 <sup>abc</sup>	2.11 ± 0.18 <sup>abc</sup>	9.96 ± 0.84 <sup>a</sup>	11.74 ± 0.57 <sup>a</sup>	52.96 ± 0.21 <sup>a</sup>

Los valores presentados son el promedio ± desviación estándar, (ELN) extracto libre de nitrógeno. los valores que no comparten una letra son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ).

El menor valor de proteína fue encontrado en el tratamiento 9 (9.29%) bajo las siguientes condiciones: temperatura de 150 °C, contenido de humedad de 22%; y el mayor se obtuvo en el tratamiento 5 (12.54%), bajo las siguientes condiciones: temperatura de 135 °C, contenido de humedad de 19%. Por otra parte, los valores de fibra están en un intervalo de 10.18 - 12.15%. El modelo de regresión ajustado a los resultados experimentales de fibra, mostró un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.71$  como se observa en la Tabla 20, el modelo de regresión no fue significativo ( $p > 0.05$ ). El menor valor de fibra fue encontrado en el tratamiento 2 (10.18%) bajo las siguientes condiciones: temperatura de 135 °C, contenido de humedad de 19%; y el mayor se obtuvo en el tratamiento 10 (12.15%), bajo las siguientes condiciones: temperatura de 135 °C, contenido de humedad de 19%. La temperatura de extrusión en su término cuadrático presento efecto significativo ( $p < 0.05$ ) positivo Tabla 20. En la Figura 29, se puede observar que la temperatura fue la variable que presento un mayor efecto en el contenido de proteína, de acuerdo con el diagrama de Pareto.

**Tabla 20.** Coeficientes estimados por regresión lineal múltiple de Proteína y Fibra de las dietas extrudidas.

Coeficientes	Dieta con piña		Dieta control	
	Proteína	Fibra	Proteína	Fibra
Intercepto	7.44	8.6	13.06	10.84
A-Humedad	<b>-1.32</b>	0.35	0.039	0.096
B-Temperatura	<b>-0.69</b>	<b>1.23</b>	<b>-0.92</b>	0.23
A <sup>2</sup>	-0.47	-0.23	<b>-1.47</b>	0.33
B <sup>2</sup>	0.58	<b>1.05</b>	<b>-1.31</b>	<b>0.43</b>
AB	-0.68	0.44	-0.048	-0.082
R <sup>2</sup>	0.85	0.84	0.95	0.71
<i>P model</i>	0.03	0.04	0.002	0.16
Lack of Fit	0.16	0.16	0.34	0.96

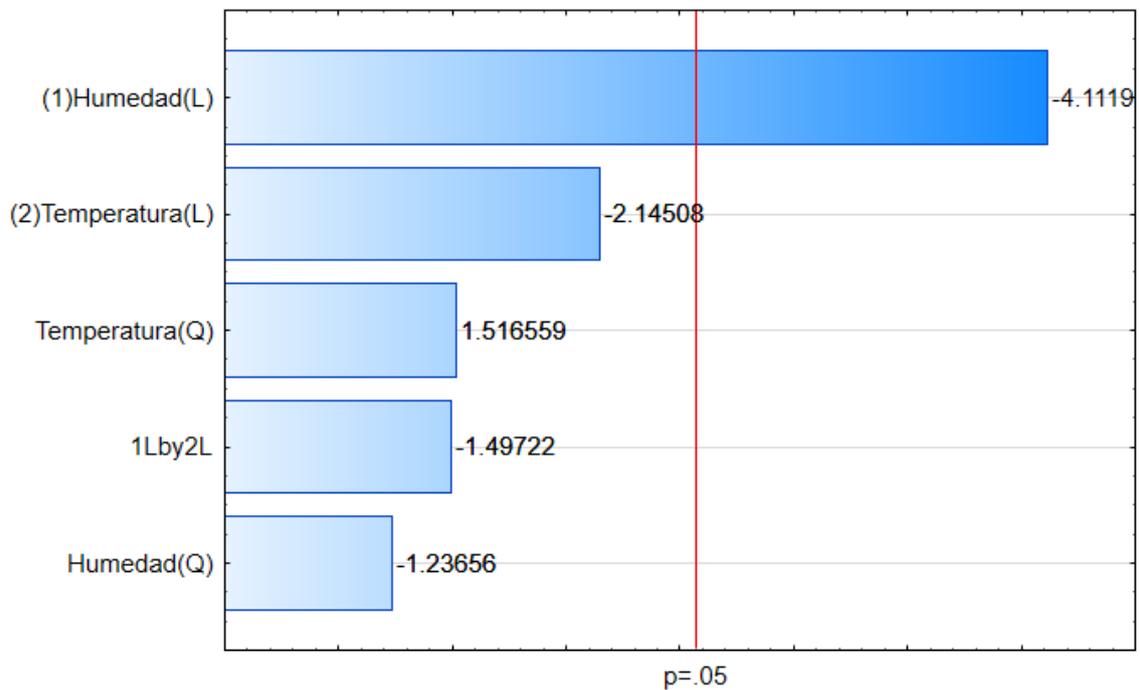
Nota: Los números en negrita indican estimaciones de parámetros significativos ( $p < 0.05$ ).

El contenido de proteínas en ambas dietas fue afectado significativamente por la temperatura de extrusión Figura 28 y 29, ya que al aumentar la temperatura de extrusión se disminuyó el contenido de proteínas en ambos casos, donde se observa que el mayor contenido se encuentra en la DC, esto debido al alto porcentaje de proteína proveniente de la alfalfa, ya que esta presenta mayor

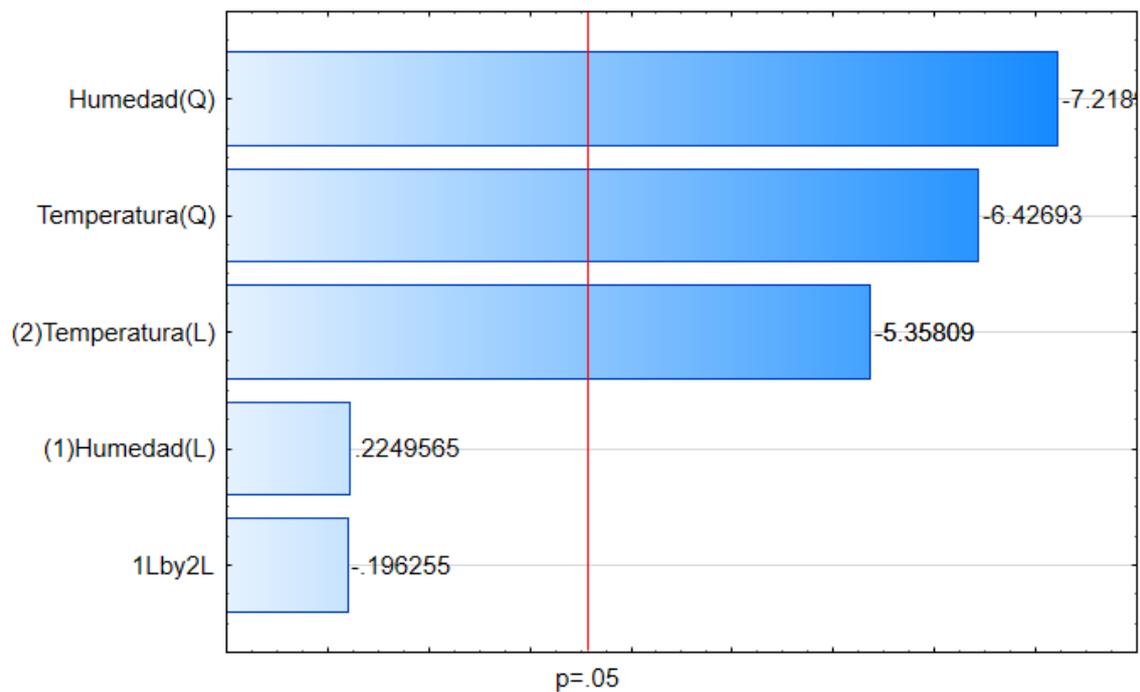
contenido de proteína en comparación del polvo de piña. Las proteínas son compuestos lábiles al calor y se ven significativamente afectadas por la cocción por extrusión. Las proteínas solubles en álcali se degradan más a una temperatura de extrusión de 135 - 150 °C que, a 120 °C, El contenido de humedad, por otro lado, afecta positivamente la agregación de proteínas y afecta negativamente la interacción de la proteína (Chanvrier et al., 2015). Zhang et al. (2017) mencionan que la reducción de proteína soluble en los extrudidos se debe al efecto predominante de agregación de proteínas producida térmicamente sobre la degradación de proteínas, lo cual disminuye la solubilidad de proteínas. Una comparación de la relación de extracción de proteínas de las harinas extruidas usando el mismo bloque de amasado muestra que el aumento del contenido de humedad del barril durante la extrusión reduce la proporción de extracción de proteínas. La extrusión con un alto contenido de humedad en el barril (36%) favorece la agregación de proteínas en comparación con la extrusión con baja humedad en el barril (24 %).

Da Silva Teba et al. (2017) encontraron un aumento significativo de aminoácidos después de la extrusión mientras que sus pérdidas se debieron a la reacción de Maillard. Además, revelaron que la extrusión severa (baja humedad y alta temperatura) provocó una mayor pérdida de aminoácidos. Además, el menor cizallamiento y disipación de energía mecánica como resultado de una mayor humedad del alimento provoca una mayor retención de aminoácidos (da Silva et al., 2016).

Además, la cizalla mecánica rompe las moléculas de proteína, mejorando la digestibilidad de la proteína. Además, se observó un aumento significativo de la digestibilidad de la proteína *in vitro* para la mezcla de harina de arroz, guisantes y algarroba (Arribas et al., 2017).



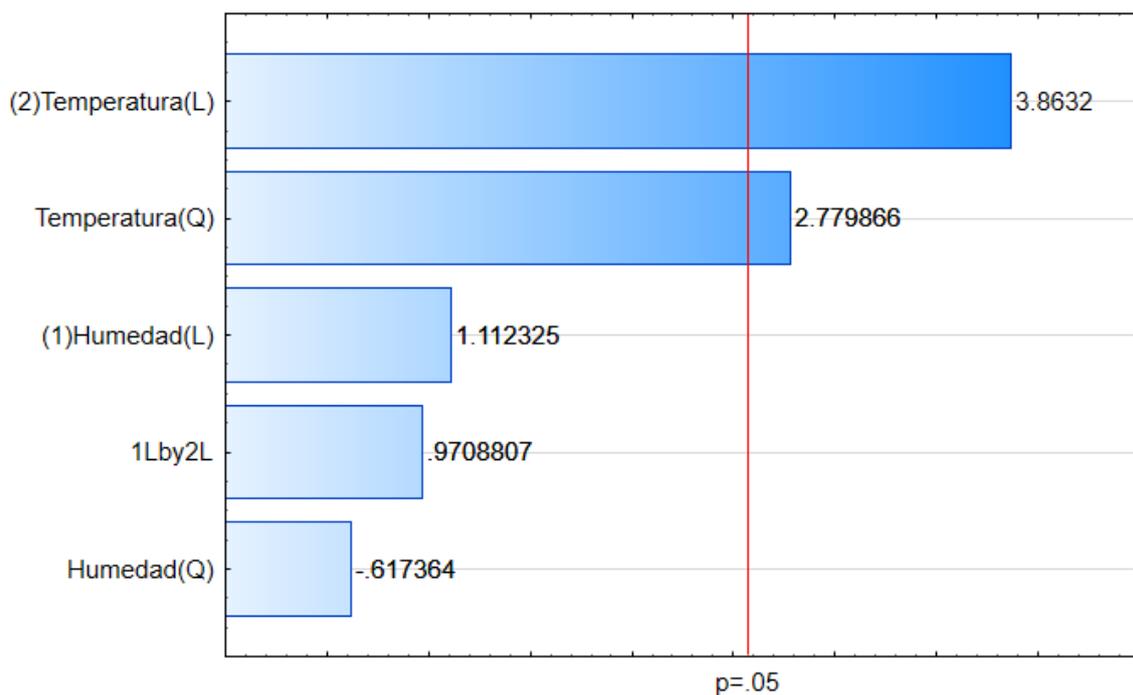
**Figura 28.** Diagrama de Pareto del contenido de proteína de los extrudidos DP.



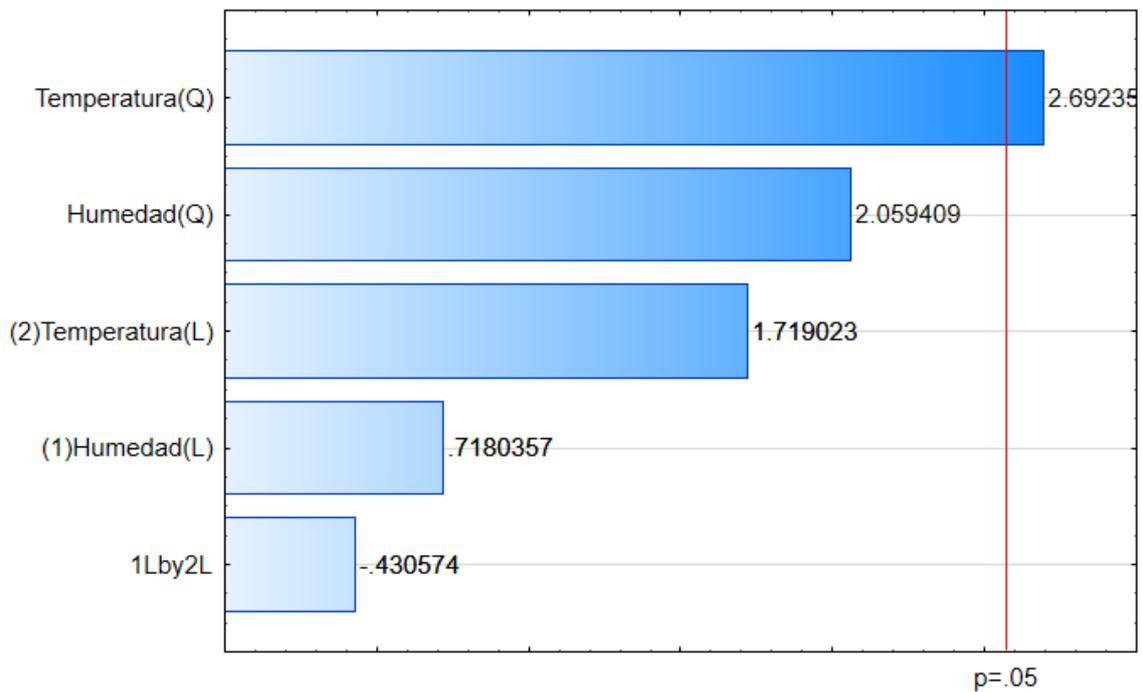
**Figura 29.** Diagrama de Pareto del contenido de proteína de los extrudidos DC.

El contenido de fibra no tuvo diferencias significativas, en ambos casos la temperatura tuvo un efecto significativo positivo Figura 30 y 31, ya que al aumentar las temperaturas de extrusión el contenido de fibra aumento es puede

deberse a la evaporación del agua en los extrudidos y la desnaturalización de las proteínas que estas interactuando con la fibra, en el proceso de extrusión, la temperatura y la velocidad del tornillo han mostrado un efecto profundo en la fibra (Alam et al., 2016). Las fibras insolubles en el polvo de recorte de coliflor se convirtieron en fibra soluble debido a la extrusión. Por otra parte, Liu et al. (2018) descubrieron que el mayor contenido de fibra dietética reduce significativamente el contenido de almidón de digestión rápida del arroz extruido, ya que cuando no se agrega proteína en la formulación, la fibra se incrusta en la matriz de almidón. Además, en combinación con la proteína, afecta la capacidad de expansión del material, así como el espesor de la pared celular (Beck et al., 2018). Da Silva et al. (2016) informaron que el aumento en el contenido de fibra en la formulación del alimento reduce el almidón y, en última instancia, la complejión de almidón y lípidos.



**Figura 30.** Diagrama de Pareto del contenido de Fibra de los extrudidos DP.



**Figura 31.** Diagrama de Pareto del contenido de Fibra de los extrudidos DC.

## 7.10 OPTIMIZACIÓN DE LAS DIETAS EXTRUDIDAS.

En la Tabla 21 se presentan los valores de la optimización de los productos extrudidos para ambas dietas, en base a las variables de respuesta como: proteína, fibra índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y grado de gelatinización. Los valores óptimos obtenidos para el contenido de humedad en el caso de la dieta DP fueron del 17.31% y temperaturas de extrusión de 150 °C, en el caso de la dieta control el contenido de humedad óptimo es de 18.4% y una temperatura de 150 °C, con estas condiciones se obtendrán los mayores valores para las respuestas que tienen mayor importancia.

**Tabla 21.** Optimización del proceso de las dietas extrudidas.

Variables del proceso	Importancia	Dieta con Piña		Valor óptimo	Dieta Control		Valor Óptimo
		Valor experimental			Valor experimental		
		Min	Max		Min	Max	
Humedad	3	16	22	17.31	16	22	18.4
Temperatura	3	120	150	150	120	150	150
Torque	3	13.8	36.21	21.1	13.94	45.96	28.359
EME	3	114.14	291.28	168.69	115.66	359.63	208.754
TR	3	75.6	91.2	80.02	77.4	92.4	81.0669
IE	3	1.06	1.11	1.1	1.04	1.15	1.14
DA	3	0.94	1.13	1.06	0.94	1.45	0.99
Dureza	3	53.83	85.75	68.5	44.99	70.34	55.07
Proteína	5	4.38	9.11	8.3	9.29	13.48	10.77
Fibra	5	8.07	13.54	10.36	10.18	12.16	11.51
IAA	5	3.24	3.93	3.74	3.36	4.46	4.3
ISA	5	11.59	14.07	13.13	6.05	8.84	6.98
pH	3	5.49	5.65	5.62	6.09	6.23	6.21
$L^*$	3	65.06	74.37	66.46	63.16	70.35	65.37
$a^*$	3	3.92	5.38	4.89	1.7	2.41	2.21
$b^*$	3	17.93	19.4	18.08	13.72	15.85	14.82
$C^*$	3	18.56	20.13	18.66	12.02	16.02	14.74
$h^\circ$	3	1.28	1.36	1.3	1.4	1.44	1.42
$\Delta E$	3	11.87	16.38	15.33	7.06	9.01	8.53
Grado de Gelatinización	5	0.89	5.71	4.68	0.81	2.97	2.53
Deseabilidad			<b>0.696</b>			<b>0.563</b>	

Abreviaturas: EME = Energía mecánica específica, TR = Tiempo de residencia, IE = Índice de expansión, DA = Densidad aparente, IAA = índice de absorción de agua, ISA = índice de solubilidad en agua.

## VIII. CONCLUSIONES

- Los coeficientes estimados para la EME y Torque en ambas dietas indicaron el contenido de humedad presentó un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) para estas respuestas.
- En general el contenido de humedad y la temperatura de extrusión tuvieron un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre los parámetros del proceso de extrusión.
- Los resultados para el índice de expansión son menores (1.11) en la dieta con piña en comparación con la dieta control (1.14) esto, mostrando un efecto significativo negativo en el contenido de humedad.
- Los valores de DA fueron mayor en la dieta control en comparación con la dieta con piña, ya que, el aumento del contenido de fibra en la dieta control provocó valores de  $1.45 \text{ g/cm}^3$  de DA.
- La temperatura tuvo un efecto significativo en el índice de absorción de agua en ambas dietas, ya que al incrementar los valores de temperatura se obtuvieron valores 3.24 a 4.46 g/g de IAA.
- El contenido de proteína y fibra fue un factor que afectó directamente al porcentaje de ISA para la dieta control, ya que se obtuvo menos material soluble.
- El efecto de las variables de extrusión sobre la proteína afecto negativamente, ya que al aumentar la temperatura de extrusión disminuyó el contenido de proteína.
- La temperatura tuvo un efecto significativo positivo ( $p < 0.05$ ) sobre el grado de gelatinización en ambas dietas, ya que al aumentar la temperatura se generó una mayor gelatinización del almidón.
- El grado de gelatinización fue mayor en la dieta con piña (5.71%) en comparación con la dieta control donde se obtuvo un 2.97%.
- Utilizar los residuos de piña en la elaboración de alimentos para ganado bovino ayuda a que se obtengan alimentos con contenidos de fibra y proteínas similares a los existentes en el mercado, por otra parte, se disminuye el contenido de alfalfa, ya que esta aumenta el costo en alimentos, esto disminuyendo los costos del producto y por último se le puede dar un valor y un uso a los residuos agroindustriales de la piña.

## REFERENCIAS

1. Ačkar, U., Jozinović, A., Babić, J., Miličević, B., Panak Balentić, J., & ŠUbarić, D. (2018). Resolving the problem of poor expansion in corn extrudates enriched with food industry by-products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 517–524.
2. Aguilera, R. (2011). Morfología del tracto digestivo de lechones alimentados con dietas con aislado y concentrado. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 48, 15-34.
3. Aguirre, D. y Calderón, Y. (2015). Elaboración de una mezcla alimenticia extruida a base de harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), arroz (*Oryza Sativa*) y frijol gandul (*Canajuscajan*) saborizado con harina de lúcuma (tesis de pregrado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú. Recuperado el 20 de octubre del 2020.
4. Ahmed, Z. S. (1999). Physico-chemical, structural and sensory quality of corn-based flax snack. *Nahrung*, 43, 253-257.
5. Alam, M. S., Pathania, S., and Sharma, A. (2016). Optimization of the extrusion process for development of high fibre soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings. *LWT*, 74, 135-144.
6. Alam, MS, Pathania, S. y Sharma, A. (2016). Optimización del proceso de extrusión para desarrollo de snacks listos para comer de soja y arroz con alto contenido de fibra utilizando orujo de zanahoria y recortes de coliflor. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie- Ciencia y Tecnología de los alimentos*, 74, 135–144.
7. Amaya Llano, S. L., Hernandez, N. M., Tostado, E. C., & Martínez-Bustos, F. (2007). Functional characteristics of extruded blends of whey protein concentrate and corn starch. *Cereal Chemistry*, 84(2), 195–201.
8. Anderson, R. A., Conway. H. F., Pfeifer, V. F., & Griffin, E. L., Jr. (1969). Roll and extrusion cooking of grain sorghum grits. *Cereal Science Today* 14:372-375.
9. Araiza-Rosales-Elia-Esther, Díaz Barbosa Dante Yamid, Reyes Jáquez Damián, Rodríguez Miranda Jesús, Vargas Rodríguez Jessica (2011). La Extrusión del frijol de desecho como una solución para los problemas de alimentación del ganado bovino en Durango durante la época de sequía. *Extenso de innovación. Instituto Tecnológico de Durango. Victoria de Durango., Dgo, México.* Recuperado el 20 de octubre del 2020.
10. Araujo, C.; Rincón, A.M.; Padilla, F. (2004). Caracterización del almidón nativo de *Dioscorea bulbifera* L. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 54(2): 241-245.
11. Arribas, C., Cabellos, B., Sánchez, C., Cuadrado, C., Guillamón, E., & Pedrosa, MM (2017). El impacto de la extrusión en la composición nutricional, fibra dietética y digestibilidad in vitro de snacks sin gluten a base de mezclas de harina de arroz, guisante y algarroba. *Alimentación y Funciones*, 8(10), 3654–3663.
12. Barrantes, Edwi Orozco, (2006). Requerimientos nutricionales de bovinos. Disponible, [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/manual\\_b\\_forraje\\_ros\\_04.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/manual_b_forraje_ros_04.pdf) (fecha de consulta: 14/10/2020).

13. Beck, SM, Knoerzer, K., Foerster, M., Mayo, S., Philipp, C. y Arcot, J. **(2018)**. Bajo Extrusión de humedad de mezclas de almidón de arroz fortificadas con fibra de guisante y proteína de guisante. *Diario de Ingeniería de Alimentos*, 231, 61–71.
14. Beltrán, M. & Marcilla, A., **(2012)**. *Tecnología de polímeros Procesado y propiedades*. Madrid: Unión de Editoriales España. ISBN 978-84-9717-232-5.
15. Bollongino, R.; Burger, J.; Powell, A.; Mashkour, M.; Vigne, J.-D.; Thomas, MG **(2012)**. "El ganado taurino moderno desciende de un pequeño número de fundadores del Cercano Oriente". *Biología Molecular y Evolución*. 29(9): 2101–2104. doi: 10.1093 / molbev / mss092. PMID 22422765.
16. Bongers, P., & Almeida-Rivera, C. **(2011)**. Dynamic modelling of the margarine production process. In M. C. G. E.N. Pistikopoulos & A. C. Kokossis (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering Vol. Volume 29*. 1301-1305.
17. Bowen SE, Grey DA, Giraud C, Majzoobi M, Testa CEM, Pérez LAB, Hill SE **(2006)**. Lipid oxidation and amylopectin molecular weight changes occurring during storage of extruded starch samples. *Journal of Cereal Science*, 43(3), 275-283.
18. Carrasco Garcia, D. **(2016)**. Aspectos generales sobre el rumen y su fisiología. Recuperado 25 de octubre de 2020, de <https://www.ganaderia.com/destacado/Aspectos-generales-sobre-el-rumen-y-su-fisiologia>.
19. Cinfovcljc. (8 de julio de **2014**). Ganado vacuno. Obtenido de Mi partida: recuperado el 15 de octubre del 2020. [https://www.ecured.cu/Ganado\\_vacuno](https://www.ecured.cu/Ganado_vacuno).
20. Costa, J. M. C., Felipe, E. M. F., Maia, G. A., Brasil, I. M., & Hernandez, F. F. H. **(2007)**. Comparação dos parâmetros físico-químicos e químicos de pós alimentícios obtidos de resíduos de abacaxi. *Revista Ciência Agrônômica*, 38, 228–232.
21. Dehghan-Shoar, Z., Hardacre, A. K., & Brennan, C. S. **(2010)**. The physico-chemical characteristics of extruded snacks enriched with tomato lycopene. *Food Chemistry*, 123, 1117–1122.
22. Coutinho, L. S., Batista, J. E. R., Caliari, M., and Soares, M. S. J. **(2013)**. Optimization of extrusion variables for the production of snacks from by-products of rice and soybean. *Food Science and Technology*, 33(4), 705-712.
23. Crampton, E. W. **(2014)**. *Nutrición animal aplicada* (3.a ed., Vol. 1). Acribia. Recuperado el 25 de agosto del 2020.
24. Cruz-Suarez Elizabeth, L., Ruiz Díaz, P., Cota Cerecer, E., Nieto Lopez, M., Guajardo Barbosa, C., Tapia Salazar, M., Villarreal Cavazos, D., & Ricque Marie, D. **(2015)**. Revisión sobre Algunas Características Físicas y Control de Calidad de Alimentos Comerciales para Camarón en México. *Nutrición Acuícola*, 6(2), 330-365.
25. Da Silva Teba, C., da Silva, EMM, Chávez, DWH, de Carvalho, CWP, & Ascheri, J. LR **(2017)**. Efectos del concentrado de proteína de suero, la humedad y la temperatura del alimento sobre las características fisicoquímicas de una harina extruida a base de arroz. *Química de los alimentos*, 228, 287–296.

26. De Pilli, T., Carbone, B.F., Derossi, A., Fiore, A.G., and Severini, C. **(2008)**. Effects of operating conditions on oil loss and structure of almond snacks. *Journal. Food Science.* 43, 430- 439.
27. Dey, D.; Richter, J.K.; Ek, P.; Gu, B.J.; Ganjyal, G.M. **(2021)** Utilization of Food Processing By-products in Extrusion Processing: A Review. *Front. Sustain. Food Syst.* 4, 3751.
28. Ding, Q.-B., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G., & Marson, H. **(2006)**. The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, 73(2), 142–148.
29. Dini, I., Tenore, G. C., and Dini, A. **(2013)**. Effect of industrial and domestic processing on antioxidant properties of pumpkin pulp. *LWT-Food Science and Technology*, 53(1), 382-385.
30. Dussán-Sarria, S., Rivera, M. C., & García-Mogollon, C. A. **(2020)**. Almacenamiento refrigerado de piña mínimamente procesada. Cambios en atributos físico-químicos y sensoriales. *Información Tecnológica*, 31(2), 11-18.
31. Elizondo-Salazar Jorge Alberto, Campos-Granados Carlos M. **(2014)**. Características nutricionales de la cáscara de piña ensilada con cantidades crecientes de urea y heno. *Nutrición Animal Tropical* 8(2): 51-71.
32. Elizondo-Salazar, J. A. **(2020)**. Estimación de la energía calórica en alimentos para ganado de leche según el modelo del NRC (2001). *Nutrición Animal Tropical*, 14(2), 39-50.
33. FAOSTAT. **(2018)**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (Publicación en línea, disponible en internet en el sitio <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> [citado el 24-10-2020]).
34. Fernández curí, E. (Ed.). **(2013)**. Formulación de alimentos balanceados y mejoramiento genético en ganado lechero (N.o 16). AGRO. Recuperado el 15 de marzo del 2020.
35. Fernández Mayer, A. **(2015)**. SUBPRODUCTOS DE REGIONES TEMPLADAS (N.o 10). EEA Bordenave. Recuperado el 20 de octubre del 2020.[http://www.produccionanimal.com.ar/tablas\\_composicion\\_alimentos/120-Transformacion\\_de\\_subproductos.pdf](http://www.produccionanimal.com.ar/tablas_composicion_alimentos/120-Transformacion_de_subproductos.pdf)
36. Fernández, B. y Vera, G. **(2014)**. Elaboración de un producto extruido en base a harinas de algarroba (*Prosopis pallida*), arroz (*Oriza sativa*) y maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Peru.
37. Francisco Lanuza A. I. R. **(2006)**. Requerimientos de nutrientes según estado fisiológico en bovinos de leche. *Boletín inia* n° 148 (págs. 4 - 8). Instituto de investigaciones agropecuarias – centro regional de investigación remehue.
38. García. G. **(2008)**. Cálculo de la energía neta para lactación y su predisposición desde el punto de vista de la fibra. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. *Revista Mexicana ciencias Pecurias*;2(1):101-115.
39. Gimenez. **(2015)**. Producción y manejo de carne bovina en Chile. Manual de producción bovina. Santiago de Chile.: colección de libros INIA n°16. Recuperado el 5 de septiembre del 2020.
40. González, L. **(2017)**. Caracterización macroscópica de las lesiones anatomopatológicas de los compartimentos del estómago en los bovinos que

- se faenan en el Camal Municipal de Guayaquil. Guayaquil: Universidad Agraria del Ecuador. Citado el 17 de octubre del 2020.
41. Gonzalo Ramírez, R (2017). Principios De Nutrición De Rumiantes (1.a ed., Vol. 3). Palibrio.
  42. Gujska, E. and Khan, K. (1990). High temperature extrusion effects on protein solubility and distribution in navy and pinto beans. *Journal Food Science*. 55: 466.
  43. Gutiérrez Borroto, Odilia (2015). La fisiología digestiva del rumiante, objeto de investigación en el Instituto de Ciencia Animal durante cincuenta años. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 49 (2), 179-188.
  44. Gutiérrez, F., Rojas-Bourillón, A., Dormond, H., Poore, M., WingChing-Jones, R. (2003). Características nutricionales y fermentativas de mezclas ensiladas de desechos de piña y avícolas. *Agronomía costarricense*. 27, 78-89.
  45. Hernández-Medrano, J.H., and L. Corona (2018). El metano y la ganadería bovina en México: parte de la solución y no del problema. *AGROProductividad*, 11 (2), 46-56.
  46. Huang, Y., Chow, C. & Fang, Y. (2011). Preparation and physicochemical properties of fiber-rich fraction from pineapple peels as a potential ingredient. *Journal of Food and Drug Analysis*. 19, 318–323.
  47. Igual, M., Chiş, M. S., Socaci, S. A., Vodnar, D. C., Ranga, F., Martínez-Monzó, J., & García-Segovia, P. (2021). Effect of *Medicago sativa* Addition on Physicochemical, Nutritional and Functional Characteristics of Corn Extrudates. *Foods*, 10(5), 1-21.
  48. Ishak, Z., Bakri, N. F. M., Maarof, S., Hassan, H., Razali, R., & Hashim, M. F. (2021). Effect of Extrusion and Steam Pressure on Fiber and Nutritional Properties of Pineapple Peels. *Asian Food Science Journal*, 96–105.
  49. Jin, Z.; Hsieh, F.; Huff, H. (1995). Effects of soy fiber, salt, sugar and screw speed on physical properties and microstructure of corn meal extrudate. *Journal of Cereal Science*. 22, 185–194.
  50. Juan Carlos Avella Castelblanco. (2014). aprovechamiento residuos biomasa de producción de piña. Colombia. Recuperado el 10 de febrero del 2020 de <https://www.aguazul-casanare.gov.co/estudios-e-investigaciones/aprovechamiento-residuos-biomasa-de-produccion-de-pina>.
  51. Lazou, A., & Krokida, M. (2010). Structural and textural characterization of corn–lentil extruded snacks. *Journal of Food Engineering*, 100, 392–408.
  52. Liang, J., Nabi, M., Zhang, P., Zhang, G., Cai, Y., Wang, Q., Zhou, Z., & Ding, Y. (2020). Promising biological conversion of lignocellulosic biomass to renewable energy with rumen microorganisms: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134.
  53. Liu, X., Zhao, J., Zhang, X., Li, Y., Zhao, J., Li, T., Zhou, B., Yang, H. & Qiao, L. (2018). Enriquecimiento de fibra dietética de soja y grano de arroz fortificado con proteína mediante cocción por extrusión de harina seca: las propiedades fisicoquímicas, de pegajosidad, sabor, palatabilidad, cocción y digestibilidad del almidón. *Avances RSC*, 8(47), 26682–26690.
  54. Llopart, E. (2011). “Efectos de las condiciones de extrusión en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de productos extrudidos de sorgo integral de bajo contenido de taninos” (tesis de grado). Universidad Nacional Del Litoral, Santa Fe, Argentina.

55. López M., Wingching R., Rojas A. **(2008)**. Características fermentativas y nutricionales del ensilaje de rastrojo de piña (*Ananas comosus*). *Agronomía Costarricense* 33(1): 1-15.
56. López-Herrera, M., WingChing-Jones, R., Rojas-Bourrillón, A. **(2014)**. Meta-análisis de los subproductos de piña (*Ananas comosus*) para la alimentación animal. *Agronomía Mesoamericana*. (25), 383-392.
57. Manosalvas, A., Taimal, R., & Villacrés, E. **(2019)**. Efecto de la humedad de alimentación y temperatura de extrusión sobre el contenido nutricional de un snack a base de maíz, chocho y papa. *Bases de la Ciencia*, 4(3), 67-80.
58. Marlon Andrés Batallas Canchig **(2018)**. La suplementación con polen en alevines de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) medidos a través del peso y talla. Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar el Título de: Médico Veterinario Zootecnista.
59. Martín P. **(2009)**. Uso de residuales agroindustriales en la alimentación animal en Cuba: pasado, presente y futuro. *Avance e Investigación Agropecuaria*, 13(3):3-10.
60. Martínez Castro, C. J., Ríos Castillo, M., & Castillo Leal, M. **(2020)**. Levels of technological adoption in pineapple production units in Loma Bonita, Oaxaca, Mexico. *Revista de Geografía Agrícola*, 64, 232-257.
61. Medina-Rendon, E. A., Guatemala-Morales, G.M., Padilla-Camberos, E., Corona-González, R. I., Arriola-Guevara, E., & García-Fajardo, J. A. **(2021)**. Production of Extrudate Food with Mango By-Products (*Mangifera indica*): Analysis of Physical, Chemical, and Sensorial Properties. *Processes*, 9(9), 1660.
62. Moraïs, S., & Mizrahi, I. **(2019)**. The Road Not Taken: The Rumen Microbiome, Functional Groups, and Community States. *Trends in Microbiology*, 27(6), 538-549.
63. Moraru CI, Kokini JL **(2003)** Nucleación y expansión durante extrusión y calentamiento por microondas de cereales *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2(4), 147-165.
64. Nascimento, E. M. D. G. C. D., Carvalho, C. W. P., Takeiti, C. Y., Freitas, D. D. G. C., & Ascheri, J. L. R. **(2012)**. Use of sesame oil cake (*Sesamum indicum* L.) on corn expanded extrudates. *Food Research International*, 45, 434-443.
65. Obregón. L. **(2015)**. Formulación de raciones para carne y leche. desarrollo de un módulo práctico para técnicos y estudiantes de ganadería de Guanacaste. Costa Rica. Intersedes. (29),128-153.
66. Patil, R.T., Berrios, J.J., Tang, J., Pan, J., and Swansosn, B. **(2005)**. Physical characteristics of food extrudates: Review. An ASAE Meeting Presentation Paper Number: 056166.
67. Pei-Ling, L., Xiao-Song, H., Qun, S. (2010). Effect of high hydrostatic pressure on starches: A review. *Starch - Stärke* 62(12): 615-628.
68. Ramirez, R. **(2012)**. Desarrollo de una propuesta para el aprendizaje del sistema digestivo por medio de las analogías. *Rev Colom Cienc Pecua* vol.24 no.2, 205-212.
69. Ramírez-Ramírez, J., Loya-Olguín, J., Ulloa, J., Rosas-Ulloa, P., Gutiérrez-Leyva, R., & Silva-Carrillo, Y. **(2020)**. Aprovechamiento de desechos de pescado y cáscara de piña para producir ensilado biológico. *Abanico Veterinario*, 10, 1–12.

70. Rasgado Vázquez, S. M., Trejo Márquez, M. A., & Pascual-Bustamante, S. **(2016)**. Extracción de fibra en residuos agroindustriales de piña para su aplicación en alimentos funcionales. *Productos Vegetales*. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/1/3/77.pdf>. Recuperado el 22 de octubre del 2020.
71. Rebolledo, Alejandro Enrique. **(2003)**. *Fisiología Digestiva y Metabólica de los Rumiantes*. Editorial EDULP. 34 - 41.
72. Reis, T. **(2012)**. Cambios nutrimentales en el ternero y desarrollo morfo fisiológico de su aparato digestivo. *Veterinaria México*, 43 (2), 31-40.
73. Relling, Alejandro Enrique, **(2003)**. *Fisiología Digestiva y Metabólica de los Rumiantes*. Editorial EDULP. Recuperado el 17 de octubre del 2020.
74. Reyes-Jáquez D., Vargas-Rodríguez J., Delgado-Licon E., Rodríguez-Miranda J., Araiza-Rosales EE, Andrade-González I., Solís-Soto A. y Medrano-Roldan H. **(2011)**. Optimización de la temperatura del proceso de extrusión y el contenido de humedad en las propiedades funcionales *in vitro* Digestibilidad del alimento para ganado bovino elaborado de Harina de Frijoles Desechos. *Journal of Animal Science Advances*,1 (2): 100-110.
75. Rivera-Mirón, M. I., Torruco-Uco, J. G., Carmona-García, R., & Rodríguez-Miranda, J. **(2020)**. Optimization of an extrusion process for the development of a fiber-rich, ready-to-eat snack from pineapple by-products and sweet whey protein based on corn starch. *Journal of Food Process Engineering*, 43(11), 1-12.
76. Rodríguez, R. y Sosa, Areadne y Rodríguez, Yeni **(2007)**. La síntesis de proteína microbiana en el rumen y su importancia para los rumiantes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 41 (4), 303-311.
77. Rodríguez-Miranda, J., Ramírez-Wong, B., Vivar-Vera, M. A., Solís-Soto, A., Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., Medrano-Roldan, H., & Delgado-Licon, E. **(2014)**. Effect of bean flour concentration (*Phaseolus vulgaris*), moisture content and extrusion temperature on the functional properties of aqua feeds. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13, 649–666.
78. Rosas D, Ortiz H, Herrera J y Leyva O. **(2016)**. Revalorización de algunos residuos agroindustriales y su potencial de aplicación a suelos agrícolas. *Agroproductividad*, 9(8):18-23.
79. Rural, D. A. D. S. Y. **(2019, 20 mayo)**. Ganadera bovina y sus derivados. [gob.mx. https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/ganaderia-bovina-y-sus-derivados](https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/ganaderia-bovina-y-sus-derivados).
80. Sacchetti, G., Pinnavaia, G. G., Guidolin, E., and Dalla Rosa, M. **(2004)**. Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products. *Food Research International*, 37(5), 527-534.
81. SAGARPA. **(2018)**. La piña, una fruta de excelencia. Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (Publicación en línea, disponible en internet en el sitio <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/lapinaunafrutadeexcelencia?idiom=es>)
82. Samyor, D., Deka, S. C., & Das, A. B. **(2018)**. Effect of extrusion conditions on the physicochemical and phytochemical properties of red rice and passion fruit powder based extrudates. *Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 5003–5013.
83. Saval S. **(2012)**. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *Bio-Tecnología*, 16(2):14-16.

84. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, G. O. B. M. X. **(2017)**. Se afianza México dentro de los 10 productores mundiales de piña. gov.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/se-afianza-mexico-dentro-de-los-10productoresmundialesdepina#:~:text=Los%20principales%20estados%20productores%20de,y%20Jalisco%2C%202.8%20por%20ciento>.
85. Selani, M. M., Brazaca, S. G. C., dos Santos Dias, C. T., Ratnayake, W. S., Flores, R. A., & Bianchini, A. **(2014)**. Characterisation and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fibre enhancement. *Food Chemistry*, 163, 23–30.
86. SIAP. **(2022)**. Producción ganadera (N.o 3) recuperado el 15 de octubre del 2020. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-pecuaria>.
87. Singha, P., Singh, S. K., Muthukumarappan, K., & Krishnan, P. **(2018)**. Physicochemical and nutritional properties of extrudates from food grade distiller's dried grains, garbanzo flour, and corn grits. *Food Science & Nutrition*, 6(7), 1914–1926.
88. Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A., & Ibanoglu, S. **(2009)**. The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products. *Food Chemistry*, 114(1): 226-232.
89. Swati, K; Pushpinder, S R; Baljit, S; Savita, S. **(2021)**. Product characterization and antioxidant potential of rice-based jamun (*Syzygium cumini* L.) powder-supplemented extruded snacks. *Nutrafoods* (15) 49-58.
90. Tarazona. **(2012)**. Factores que afectan el comportamiento de consumo y selectividad de forrajes en rumiantes. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 473-485.
91. Tejada, L. **(1992)**. The thermal decomposition of carbohydrates. Applied Science Publishers LTD. London.
92. Téllez-Morales, J. A., Herman-Lara, E., Gómez-Aldapa, C. A., & Rodríguez-Miranda, J. **(2020)**. Techno-functional properties of the starch-protein interaction during extrusion-cooking of a model system (corn starch and whey protein isolate). *LWT*, 132, 109789.
93. Thakur, S., Singh, N., Kaur, A. y Singh, B. **(2017)**. Efecto de la extrusión en la física propiedades fisicoquímicas, digestibilidad y perfiles fenólicos de fracciones de arena obtenidas de la molienda seca de maíz normal y ceroso. *Revista de ciencia de los alimentos*, 82, 1101-1109.
94. Torres, O. y Pérez, W. **(2006)**. Tecnología de extrusión en alimentos. Cuba: Publicaciones del Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia.
95. Valenzuela-Lagarda, J. L., Gutiérrez-Dorado, R., Pacheco-Aguilar, R., Lugo-Sánchez, M. E., Valdez-Torres, J. B., Reyes-Moreno, C., Mazorra-Manzano, M. A., & Muy-Rangel, M. D. **(2016)**. Botanas expandidas a base de mezclas de harinas de calamar, maíz y papa: efecto de las variables del proceso sobre propiedades fisicoquímicas. *CyTA - Journal of Food*, 1-7.
96. van Lier, E. **(2008)**. Digestión en retículo-rumen digestión en retículo-rumen 1 ed., Vol. 2. Pag:1-5.
97. Vargas Corredor Yury Alexandra, Pérez Pérez Liliana Ibeth. **(2018)**. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista de Facultad de Ciencias Básicas*, 14 (1), 59-7.
98. Vargas J, Alvarado P, Vega J y Porras M. **(2013)**. Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. *Revista Científica*, 23(1):86-101.

99. Villot, C., Meunier, B., Bodin, J., Martin, C., & Silberberg, M. **(2017)**. Relative reticulo-rumen pH indicators for subacute ruminal acidosis detection in dairy cows. *animal*, 12(3), 481-490.
100. Wang, J., Xia, S., Wang, B., Ali, F., & Li, X. **(2019)**. Effect of twin-screw extrusion on gelatinization characteristics of oat powder. *Journal of Food Process Engineering*, 42(3).1 – 9.
101. Wang, W.M., Klopfenstein, C.F., Ponte, J.G., **(1993)**. Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat and wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chemistry*. 70, 707-711.
102. Xu, J., Blennow, A., Li, X., Chen, L. & Liu, X. **(2020)**. Gelatinization dynamics of starch in dependence of its lamellar structure, crystalline polymorphs and amylose content. *Carbohydrate Polymers* 229: 115-181.
103. Yağcı, S., & Göğüş, F. **(2008)**. Response surface methodology for evaluation of physical and functional properties of extruded snack foods developed from food-by-products. *Journal of Food Engineering*, 86(1), 122–132.
104. Yagci, S., and Gogus, F. **(2008)**. Response surface methodology for evaluation of physical and functional properties of extruded snack foods developed from food By- Products. *Journal of Food Engineering*, 86, 122-132.
105. Yagci, S., Caliskan, R., Gunes, Z. S., Capanoglu, E., & Tomas, M. **(2022)**. Impact of tomato pomace powder added to extruded snacks on the *in vitro* gastrointestinal behaviour and stability of bioactive compounds. *Food Chemistry*, 368, 130847.
106. Yang, Y., Jiao, A., Liu, Q., Xu, E., Chen, Y., & Jin, Z. **(2020)**. Functional and physical properties of naked barley-based unexpanded extrudates: effects of low temperature. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1886-1898.
107. Yanniotis, S., Petraki, A., & Soumpasi, E. **(2007)**. Effect of pectin and wheat fibers on quality attributes of extruded cornstarch. *Journal of Food Engineering*, 80, 594–599.
108. Yepes S, Montoya L y Orozco F. **(2008)**. Valorización de residuos agroindustriales –frutas– en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 61(1):4422-4431.
109. Zhang, B., Liu, G., Ying, D., Sanguansri, L. & Augustin, M. A. **(2017)**. Effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and *in vitro* protein digestibility of canola meal. *Food Research International*, 100, 658-664.