



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA**

**“DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE UN ALIMENTO  
BALANCEADO PARA GALLINAS DE POSTURA,  
EMPLEANDO HUAUZONTLE (*CHENOPODIUM  
BERLANDIERI* SUBSP *NUTTALLIAE*) Y LACTOSUERO  
COMO FUENTES PROTEICAS”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

**PRESENTA**

**JOSÉ LUIS PÉREZ RAMÍREZ**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. ROGELIO VALADEZ BLANCO**

**CO-DIRECTORA: DRA. PAULA CECILIA GUADARRAMA MENDOZA**

**HUAJUPAN DE LEÓN, OAX. SEPTIEMBRE DEL 2020**

## Expresiones de gratitud

Para mí, este año ha estado llenos de aprendizaje, crecimiento y auto descubrimiento. Estoy muy agradecido por los momentos que pasé durante el desarrollo de mi tesis de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos.

A mis padres, Jorge Pérez Jiménez y Bruna Celia Alicia Ramírez Jiménez, quienes me impulsaron en todo momento a continuar todos los días y me dieron ejemplos para ser una mejor persona y a nunca darme por vencido.

Gracias al Dr. Rogelio Valadez Blanco y a la Dra. Paula Cecilia Guadarrama Mendoza por darme la oportunidad de formar parte del equipo de Bioprocesos. Gracias por la paciencia, los consejos, la crítica, el ejemplo de profesionalismo, la comprensión y la orientación durante este proyecto. También por el tiempo dedicado a revisar esta tesis y por brindarme su valiosa ayuda.

Me gustaría agradecer a mis compañeros de laboratorio Ernestina, Magda, Ángela, Alba, Viviana y Gladis, ya que sin su ayuda este trabajo no hubiera sido posible.

A todos los maestros que me instruyeron y me proporcionaron valiosos conocimientos durante mi formación académica.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca por brindarme formación moral y académica durante mis estudios.

## RESUMEN

Considerando la constante búsqueda de fuentes proteicas alternativas que sustituyan de manera exitosa a la soya en la elaboración de alimentos balanceados para gallinas ponedoras, en el presente trabajo se propone la elaboración de un alimento balanceado para gallinas de postura Hy-line w36, mediante el aprovechamiento del potencial proteico del huauzontle y el lactosuero, junto a la incorporación de maíz amarillo como fuente energética (fuente de carbohidratos). Para la obtención de polvos proteicos del lactosuero, el suero fue sometido a un proceso de concentración usando membranas de microfiltración y de ultrafiltración, seguido de un proceso de secado por aspersion. Por otro lado, el huauzontle y el maíz fueron sometidos a una limpieza, lavado, tostado y una molienda. Se realizaron análisis fisicoquímicos tanto de las materias primas como de los productos intermedios; adicionalmente, se realizó el análisis del perfil de aminoácidos del huauzontle. Considerando estos análisis, se procedió a la optimización de la formulación del alimento balanceado en relación al costo de elaboración usando el método Simplex de programación lineal, basándose en los requerimientos nutricionales de las gallinas ponedoras Hy-line w36. Con la formulación optimizada obtenida, se procedió a la elaboración y caracterización fisicoquímica del alimento balanceado. Se obtuvieron exitosamente los polvos de huauzontle y lactosuero con 28.41 y 13.63% de proteína, respectivamente. A partir de la optimización Simplex se obtuvo una formulación con costo de elaboración mínima para 100 kg de alimento balanceado, constituida por 43.15 kg de huauzontle y 56.85 kg de maíz amarillo, sin incluir el lactosuero. A partir de la optimización se estimó que el alimento balanceado cumplía con los requerimientos limitantes para la etapa de producción de huevo, como son proteína (16.5%), lisina (0.86%) y metionina+cisteína (1.14%). Finalmente se comprobó que la composición proteica del producto final (16.88%) fue similar a la composición reportada para alimentos balanceados comerciales (16%). Con estos resultados podemos concluir que la soya puede ser sustituida satisfactoriamente por el huauzontle como fuente de proteína alternativa para la elaboración de alimentos balanceados para gallinas ponedoras Hy-line w36 en la etapa de producción de huevo.

## INDICE

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. Introducción .....</b>  | <b>1</b> |
| <b>2. Antecedentes .....</b>  | <b>3</b> |
| 2.1 Fuentes de proteína .....   | 3        |
| 2.1.1 Fuente de proteína animal .....   | 3        |
| 2.1.1.1 Clasificación de la proteína de origen animal .....                                       | 3        |
| 2.1.1.2 Importancia de la proteína animal en la dieta humana .....                                | 4        |
| 2.1.2 Fuentes de proteína vegetal.....  | 4        |
| 2.1.2.1 Clasificación de las proteínas de origen vegetal.....                                     | 5        |
| 2.2 Huevo como fuente de proteína .....   | 5        |
| 2.2.2 Proteínas del huevo .....   | 8        |
| 2.2.3 Producción de huevo.....  | 8        |
| 2.3 Gallinas de postura (Hy-Line w36) .....   | 9        |
| 2.3.1 Requerimientos nutricionales .....  | 11       |
| 2.3.2 Importancia de la proteína en la dieta de gallinas ponedoras .....                          | 16       |
| 2.4 Alimentos balanceados para gallinas de postura.....   | 17       |
| 2.4.1 Definición de alimentos balanceados .....   | 17       |
| 2.4.2 Alimentos balanceados elaborados por pequeños productores.....                              | 18       |
| 2.4.3 Alimentos balanceados para granjas industriales.....  | 18       |
| 2.4.4 Principales fuentes proteicas utilizadas en alimentos balanceados comerciales .             | 19       |
| 2.5 Fuentes proteicas alternativas potenciales para la elaboración de alimentos balanceados ..... | 19       |
| 2.5.1 Suero lácteo.....   | 20       |
| 2.5.1.1 Origen .....  | 20       |
| 2.5.1.2 Características y generalidades .....   | 21       |
| 2.5.1.3 Composición .....   | 21       |
| 2.5.1.4 Estudios reportados .....   | 22       |
| 2.5.2 Huauzontle .....  | 23       |
| 2.5.2.1 Origen y descubrimiento.....  | 23       |
| 2.5.2.2 Características y generalidades .....   | 23       |
| 2.5.2.3 Estudios reportados .....   | 24       |
| 2.6 Elaboración del alimento balanceado para gallinas de postura .....                            | 25       |
| 2.6.1 Obtención de concentrados proteicos de lactosuero en polvo .....                            | 25       |
| 2.6.1.1 Fundamentos de la filtración por membranas.....   | 25       |
| 2.6.1.2 Proceso de concentración de proteínas por membranas .....                                 | 28       |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.6.1.3 Obtención de polvos del lactosuero mediante secado por aspersión .....                               | 29        |
| 2.6.2 Obtención de proteína a partir de granos .....   | 31        |
| 2.6.2.1 Lavado (Método húmedo) .....   | 32        |
| 2.6.2.2 Tratamiento térmico (tostado) .....  | 32        |
| 2.6.2.2 Molienda .....   | 33        |
| 2.6.2.3 Extracción de aceites (desengrasado) .....   | 33        |
| 2.7 Modelo Simplex de optimización mediante un sistema de programación lineal<br>(ecuaciones lineales) ..... | 34        |
| 2.7.1 Pasos del método Simplex .....   | 39        |
| <b>3. Marco conceptual de la tesis .....</b>   | <b>43</b> |
| 3.1 Originalidad .....   | 43        |
| 3.2 Justificación .....  | 44        |
| 3.3 Objetivos .....  | 45        |
| 3.3.1 Objetivo general .....   | 45        |
| 3.3.2 Objetivos específicos .....  | 45        |
| 3.4 Metas .....  | 46        |
| <b>4. Metodología .....</b>  | <b>48</b> |
| 4.1 Caracterización del huauzontle y del maíz amarillo .....   | 48        |
| 4.1.1 Análisis proximal .....  | 48        |
| 4.1.1 Determinación del perfil de aminoácidos de las semillas de huauzontle .....                            | 52        |
| 4.2 Caracterización del lactosuero .....   | 52        |
| 4.3 Elaboración del alimento balanceado .....  | 56        |
| 4.3.1 Concentración de proteína del suero .....  | 56        |
| 4.3.1.1 Microfiltración .....  | 57        |
| 4.3.1.2 Ultrafiltración .....  | 58        |
| 4.3.2 Secado por aspersión del suero lácteo .....  | 58        |
| 4.3.3 Pesado y limpieza del huauzontle y maíz amarillo .....   | 59        |
| 4.3.4 Lavado del huauzontle y el maíz amarillo .....   | 59        |
| 4.3.5 Tostado del huauzontle y el maíz amarillo .....  | 60        |
| 4.3.6 Molienda de huauzontle y maíz amarillo .....   | 60        |
| 4.4 Análisis estadístico .....   | 60        |
| 4.5 Formulación del alimento balanceado .....  | 60        |
| 4.6 Elaboración y desarrollo del alimento balanceado para gallinas ponedoras .....                           | 64        |
| 4.7 Análisis proximal del producto final (alimento balanceado) .....   | 64        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.8 Estimación de la cantidad de aminoácidos presentes en la proteína del alimento formulado.....               | 64        |
| <b>5. Resultados y discusión.....</b>   | <b>65</b> |
| 5.1 Caracterización fisicoquímica de la semilla de huauzontle.....  | 65        |
| 5.1.1 Determinación del perfil de aminoácidos del huauzontle.....   | 66        |
| 5.2 Caracterización del maíz amarillo.....  | 69        |
| 5.3 Caracterización del suero lácteo.....   | 70        |
| 5.4 Micro y ultrafiltración del suero lácteo.....   | 71        |
| 5.4.1 Caracterización fisicoquímica de las fracciones obtenidas de la micro y ultrafiltración.....              | 71        |
| 5.5 Secado del suero lácteo.....  | 74        |
| 5.6 Formulación del alimento y optimización mediante el modelo de programación lineal.....                      | 75        |
| 5.7 Desarrollo del alimento balanceado para gallinas ponedoras.....   | 77        |
| 5.7.1 Caracterización fisicoquímica del alimento balanceado con formulación óptima para gallinas ponedoras..... | 77        |
| 5.7.2 Estimación de la cantidad de aminoácidos presentes en la proteína del alimento formulado.....             | 78        |
| <b>6. Conclusiones.....</b>   | <b>81</b> |
| <b>7. Perspectivas.....</b>   | <b>83</b> |
| <b>9. Referencias.....</b>  | <b>84</b> |
| <b>10. ANEXOS.....</b>  | <b>92</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Calificación y puntuación de aminoácidos corregida por la digestibilidad de las proteínas en alimentos de origen animal (PDCAAS) (Suárez et al., 2006). .....              | 6  |
| <b>Figura 2.</b> Ejemplar Hy-Line w36 de 6 semanas de edad (Hy-Line International, 2013). ..  | 10 |
| <b>Figura 3.</b> Gránulos de calcio fino de 0 a 2 mm (izquierda) y de calcio grueso 2 a 4 mm (derecha) (Hy-Line International, 2016). .....   | 16 |
| <b>Figura 4.</b> Ejemplar de huauzontle ( <i>Chenopodium berlandieri</i> subsp. <i>nuttalliae</i> ). .....  | 24 |
| <b>Figura 5.</b> Diagrama básico del proceso de separación por membranas. ....  | 26 |
| <b>Figura 6.</b> Diagrama del flujo perpendicular a través de una membrana. ....  | 27 |
| <b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo tangencial a través de una membrana. ....  | 27 |
| <b>Figura 8.</b> Componentes básicos de los sistemas de filtración por membranas. ....  | 28 |
| <b>Figura 9.</b> Componentes principales de un secado por aspersión: (1) sistema de calefacción, (2) sistema de atomización, (3) cámara de secado, (4) sistema de recolección de polvos. .  | 30 |
| <b>Figura 10.</b> Plano bidimensional (espacio problema). ....  | 35 |
| <b>Figura 11.</b> Espacio problema con restricciones de no negativos ( $X \geq 0$ y $Y \geq 0$ ). ....  | 36 |
| <b>Figura 12.</b> Región factible (delimitada por restricciones específicas y generales). ....  | 37 |
| <b>Figura 13.</b> Solución de menor costo resultado de la función objetivo, la cual está dentro de la región factible. ....   | 38 |
| <b>Figura 14.</b> Proceso de filtración por membrana de micro (MF) y ultrafiltración (UF) en modo de flujo tangencial. ....   | 57 |
| <b>Figura 15.</b> Componentes principales de un secado por aspersión: (1) sistema de calefacción, (2) sistema de atomización, (3) cámara de secado, (4) sistema de recolección de polvos. . | 59 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Micronutrientes contenidos en el huevo (por huevo entero de 60g).....  | 7  |
| <b>Tabla 2.</b> Producción anual de huevo en México. ....  | 9  |
| <b>Tabla 3.</b> Principales productores de huevo en México.....  | 9  |
| <b>Tabla 4.</b> Composición recomendada de nutrientes para polluelas de 0 a 3 y de 3 a 6 semanas (Hy-Line International, 2013). ....   | 12 |
| <b>Tabla 5.</b> Composición recomendada de nutrientes para la etapa de desarrollo de las gallinas de 6 a 17 semanas de edad (Hy-Line International, 2013). ....  | 13 |
| <b>Tabla 6.</b> Composición recomendada de nutrientes para la etapa de postura de las gallinas de 18 a 90 semanas de edad (Hy-Line International, 2013). ....  | 14 |
| <b>Tabla 7.</b> Cantidad de calcio y fósforo requerido en la dieta de las gallinas previo y durante la postura (Hy-Line International, 2013). ....   | 15 |
| <b>Tabla 8.</b> Componentes fisicoquímicos del suero lácteo. ....  | 21 |
| <b>Tabla 9.</b> Tabla Simplex de la M-Grande* para resolver problemas con restricciones de tipo “ $\geq$ ” .....   | 41 |
| <b>Tabla 10.</b> Tabla de resultados de optimización por el método de optimización Simplex de la M-Grande resuelta mediante iteraciones utilizando la reducción de Gauss Jordan. ....                    | 42 |
| <b>Tabla 11.</b> Análisis proximal realizado a las semillas de huauzontle y de maíz amarillo.....  | 48 |
| <b>Tabla 12.</b> Análisis fisicoquímicos para la caracterización del lactosuero. ....  | 53 |
| <b>Tabla 13.</b> Tabla inicial Simplex, con la función objetivo y restricciones normalizadas mediante el modelo Simplex de la M-Grande. ....   | 63 |
| <b>Tabla 14.</b> Determinaciones proximales realizadas a muestras representativas de semillas del huauzontle en este trabajo así como las de reportes de la literatura científica. ....                  | 65 |
| <b>Tabla 15.</b> Perfil de aminoácidos presentes en la proteína de la semilla de huauzontle. ....  | 66 |
| <b>Tabla 16.</b> Composición promedio recomendada de nutrientes para las gallinas Hy-line w36 en el periodo de postura de la semana 18 a 90 (Hy-Line International, 2013). ....                          | 67 |
| <b>Tabla 17.</b> Comparativo entre el perfil de aminoácidos del huauzontle, soya y los requerimientos de aminoácidos de las gallinas Hy-line en el periodo de postura .....                              | 68 |
| <b>Tabla 18.</b> Análisis proximal realizado al maíz amarillo (humedad, cenizas, proteínas, grasa, fibra bruta y carbohidratos).....   | 69 |
| <b>Tabla 19.</b> Análisis proximal realizado al suero lácteo (humedad, cenizas, proteínas, grasa, carbohidratos y densidad). ....  | 70 |
| <b>Tabla 20.</b> Factor de concentración volumétrica y determinaciones proximales realizadas a las fracciones de interés resultantes de los procesos de micro y ultrafiltración del suero lácteo. ....   | 72 |
| <b>Tabla 21.</b> Comparación de contenido proteico, sólidos totales y factor de concentración de las operaciones de micro y ultrafiltración. ....  | 73 |
| <b>Tabla 22.</b> Análisis de proteína y humedad realizados a los polvos obtenidos de las fracciones de microfiltración y ultrafiltración secadas del suero lácteo. ....                                  | 74 |
| <b>Tabla 23.</b> Formulación de costo optimizado para producir 100 kg de alimento balanceado para gallinas ponedora Hy-line w36 usando huauzontle, lactosuero y maíz amarillo como materias primas. .... | 75 |
| <b>Tabla 24.</b> Análisis proximal realizado al alimento balanceado óptimo para gallinas ponedoras Hy-line w36 conteniendo harinas de huauzontle y maíz amarillo como ingredientes principales. ....     | 78 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 25.</b> Estimación de los contenidos reales de lisina y metionina+cisteína en el alimento balanceado optimizado final. .... | 79 |
| <b>Tabla 26.</b> Comparativo del contenido de proteína del alimento desarrollado con dos alimentos comerciales. ....                 | 79 |

## ANEXOS

|  |    |
|--|----|
| <b>Anexo 1.</b> Recomendaciones de nutrición durante el periodo de producción .....                                | 92 |
| <b>Anexo 2.</b> Datos y curva de calibración para la determinación de azúcares reductores directos (lactosa). .... | 92 |

## 1. Introducción

En México la elaboración de alimentos balanceados para aves de corral está basada en la utilización de soya como principal fuente de proteína vegetal (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA, 2015). La soya se caracteriza por ser un alimento constituido por proteína de alta calidad, debido a la cantidad y contenido de aminoácidos esenciales. Este aspecto hace que la soya sea una de las fuentes de proteínas más valiosa en la alimentación humana y animal, conteniendo 36.9% de proteína bruta (Pirie y Swaminathan, 1975).

En México la harina de soya es utilizada para la engorda de pollos y cerdos, así como para la acuicultura y la producción de huevo. Considerando que México no es un país productor de soya, la importación de este producto es indispensable para cubrir la demanda nacional de alimentos balanceados. Durante el periodo del 2009 al 2015 en México se importó el 95.5% del total de soya consumida (SAGARPA, 2015), hecho que confirma la gran dependencia de nuestro país de la soya de Estados Unidos.

Debido a lo anterior, es de gran importancia en México buscar nuevas fuentes de proteínas alternativas. Tal es el caso del huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*), un cultivo nativo de México, cuyo potencial proteico ha sido muy poco valorizado como fuente alternativa de proteína.

Por otra parte, a diferencia del huauzontle, el suero de leche es un producto cuyo valor nutricional ha sido ampliamente estudiado. El suero lácteo está compuesto principalmente por proteínas solubles, así como también por minerales como el calcio, el potasio, el fósforo, el sodio y el magnesio, además de vitaminas del complejo B (Londoño-Urbe *et al.*, 2008). En la producción de queso se genera como residuo principal el lactosuero, el cual representa aproximadamente el 90% del volumen de leche inicial. Este suero es en ocasiones utilizado por los productores de queso en la obtención de requesón o como alimento para ganado.

Debido a ello, es importante la búsqueda e implementación de alternativas para el aprovechamiento del lactosuero, así como de cultivos nativos poco aprovechados, como es el caso del huauzontle. En este proyecto se busca desarrollar un alimento balanceado para gallinas de postura, con miras a la producción de huevo, cubriendo el perfil de aminoácidos adecuado, usando proteínas de suero lácteo y semillas de huauzontle. Con este desarrollo se

pretende proporcionar una solución a la gran dependencia de soya que existe en México en la elaboración de productos para alimentación animal.

De manera particular, se utilizará una combinación de huauzontle y suero lácteo que permita el aprovechamiento de ambos productos, y que a su vez proporcione la proteína necesaria para la producción de huevo. Con este trabajo se plantea el aprovechamiento de residuos de la industria quesera, así como la valorización y aprovechamiento del huauzontle por su gran potencial como proteína de alta calidad.

## **2. Antecedentes**

### **2.1 Fuentes de proteína**

Las proteínas son macronutrientes básicos en la alimentación humana; éstas están presentes en casi todos los tejidos y órganos del cuerpo, por ello la importancia de una dieta rica en proteínas de alta calidad. Las proteínas de alta calidad son por lo general de origen animal debido a su contenido y variedad de aminoácidos esenciales (FAO, 1995).

#### **2.1.1 Fuente de proteína animal**

Las proteínas provenientes de fuentes de origen animal contienen una mayor cantidad de aminoácidos esenciales, que por definición son aminoácidos que no pueden ser sintetizados por el organismo. Por ello, estas proteínas tienen un mayor valor biológico en comparación con las de origen vegetal, de aquí la importancia de la inclusión de estos alimentos en la dieta de las personas. Las proteínas de origen animal representan casi el 40% del total de las proteínas de consumo humano. Entre los alimentos proteicos más importantes en esta categoría se encuentran el huevo, la leche y sus derivados, el pescado, y la carne magra (FAO, 1995). Esta última es una de las fuentes proteicas más populares en la dieta humana y al mismo tiempo representa un importante problema ambiental. Se estima que para el 2050 la población mundial pasará de los 7 mil millones a 9 800 millones de habitantes, y la producción de carne de 233 millones a 470 millones de kg por año (FAO, 2009). Este crecimiento en la producción de carne representa un problema al ser la cría de ganado para producción de carne uno de los principales responsables de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmosfera, sin contar el daño al suelo y al subsuelo (Stehfest *et al.*, 2008).

##### *2.1.1.1 Clasificación de la proteína de origen animal*

La clasificación tanto de las proteínas animales como vegetales se hace con base a distintos criterios, como son su función, composición, conformación y solubilidad. En la clasificación basada en la conformación, las proteínas se dividen en:

## Holoproteínas

Estas son conocidas como proteínas simples, porque están constituidas únicamente por polipéptidos. Su descomposición o hidrólisis en subunidades da como resultado aminoácidos.

## Heteroproteínas

Estas proteínas están formadas por cadenas polipeptídicas y por otras fracciones no proteicas, llamadas grupos prostéticos. De acuerdo al grupo prostético estas proteínas se clasifican en: fosfoproteínas, glicoproteínas, lipoproteínas, cromoproteínas y nucleoproteínas. Las heteroproteínas son muy importantes en la nutrición animal debido a que éstas tienen grupos no proteicos unidos a ellas, que les permiten desempeñar funciones específicas en el organismo del que forma parte.

### *2.1.1.2 Importancia de la proteína animal en la dieta humana*

Las proteínas de origen animal se han denominado “proteínas de calidad” por contener la cantidad y variedad adecuada de aminoácidos en contraste con las proteínas de origen vegetal, que son generalmente carentes de lisina y aminoácidos azufrados. Debido a esto, los vegetarianos deben desarrollar una dieta más variada para obtener las cantidades necesarias de aminoácidos esenciales que el cuerpo necesita para llevar a cabo sus necesidades fisiológicas.

El rol de las proteínas en las actividades fisiológicas no solo del ser humano sino de los seres vivos en general, es de suma importancia debido a que éstas se encuentran involucradas en todas las funciones de los seres vivos, tales como reparación, mantenimiento y generación de tejidos, producción del plasma, hormonas, enzimas neurotransmisores, etc. La ingesta de aminoácidos esenciales a través de la nutrición proporciona a los humanos los precursores necesarios para la síntesis de proteínas, que a su vez son indispensables para la realización de las actividades fisiológicas del cuerpo.

### **2.1.2 Fuentes de proteína vegetal**

A pesar de no contar con una distribución tan balanceada de aminoácidos como las proteínas de origen animal, algunas proteínas de origen vegetal contienen los aminoácidos

necesarios para el correcto funcionamiento del cuerpo humano. En la Tabla 1 se muestran las fuentes de proteína vegetal más importantes. La combinación de alimentos de origen vegetal permite alcanzar la ingesta proteica diaria para un adulto promedio: 0.75 g de proteína por kilogramo de peso corporal (FAO, 1985).

#### *2.1.2.1 Clasificación de las proteínas de origen vegetal*

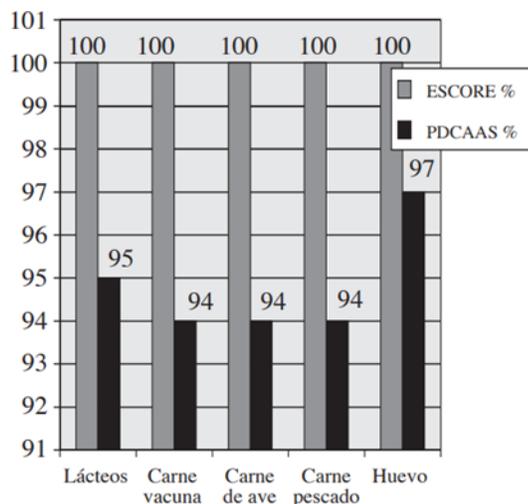
Las proteínas de origen vegetal se pueden clasificar con base a distintos criterios. De acuerdo a su función proteica, las proteínas vegetales pueden dividirse en cuatro grupos: proteínas de almacenamiento, protectoras, estructurales y metabólicas (Shewry y Casel, 1999). Otra clasificación de las proteínas se basa en la solubilidad diferencial de las diferentes fracciones proteicas (Osborne y Thomas, 1924). La fracción de albúmina es la que se obtiene a partir de una suspensión acuosa, la fracción de globulina está constituida por las proteínas solubles en disoluciones salinas, y la fracción soluble en alcohol constituye el grupo de las prolaminas. Las glutelinas son la fracción más difícil de solubilizar, y generalmente son extraíbles con álcalis débiles y ácidos o con disoluciones diluidas a base de detergente.

## **2.2 Huevo como fuente de proteína**

Desde hace varias décadas se ha tomado al huevo como el patrón de referencia de la nutrición humana en cuanto a calidad proteica se refiere. Esta calidad se evalúa de acuerdo a la cantidad y al balance de aminoácidos esenciales que contiene el alimento (puntuación proteica). La puntuación proteica refleja el contenido de aminoácidos esenciales en comparación con la proteína ideal. Asimismo, la proteína ideal se basa en el patrón de aminoácidos requerido para niños mayores a 1 año y adultos propuesta por la Academia Nacional de Ciencias EEUU (2002) para evaluar la calidad de las proteínas de las diferentes fuentes alimenticias (Olivares *et al.*, 1989). A su vez la digestibilidad de los aminoácidos en un organismo se denomina “Puntuación corregida de digestibilidad proteica de aminoácidos” o PDCAAS por sus siglas en inglés, y se define como la puntuación proteica multiplicada por la digestibilidad proteica como se muestra en la siguiente ecuación.

$$PDCAAS = (\text{puntuación proteica})(\text{digestibilidad proteica})$$

En esta Figura 1, se compara al huevo con otras fuentes de proteína animal bajo estos parámetros de calidad.



**Figura 1.** Calificación y puntuación de aminoácidos corregida por la digestibilidad de las proteínas en alimentos de origen animal (PDCAAS) (Suárez *et al.*, 2006).

En esta figura podemos observar que todos los alimentos evaluados (lácteos, carne vacuna, carne de ave, carne de pescado y huevo) cumplen al 100% con la puntuación de la proteína ideal. Sin embargo, de los 5 alimentos de origen animal, solo las proteínas de huevo tienen 97% de PDCAAS, lo que significa que estas proteínas tienen una mejor absorción y utilización en el cuerpo humano. Considerando lo anterior podemos decir que las proteínas del huevo son las más completas, por su puntuación (calidad), digestibilidad y utilidad en el organismo (PDCAAS).

Es conocido que el huevo es un alimento básico en la dieta de los mexicanos, principalmente debido a su elevado aporte proteico y valor biológico. Esto último ha posicionado al huevo incluso por encima de otros alimentos ricos en proteínas complejas, como la carne, el pescado y la leche (Suárez *et al.*, 2006). El huevo provee 12 g de proteína de alta calidad con 97% de PDCAAS por cada 100 g de producto. Este valor es superior en relación al de los lácteos, la carne vacuna, la carne de ave y la carne de pescado, que tienen 95, 94, 94 y 94%, respectivamente (Sastre *et al.*, 2002).

Además de esto, el huevo no solo tiene un papel importante como fuente de proteína de alto valor biológico, sino que también aporta cantidades importantes de otros macro y micro nutrientes. Un huevo de 60 g contiene en promedio: 6.3 g de lípidos totales divididos en ácidos grasos saturados, ácidos grasos monoinsaturados, ácidos grasos poliinsaturados con una cantidad de 1.7, 2.6 y 0.94 g, respectivamente. Asimismo el huevo es fuente de cantidades importantes de ácidos grasos esenciales como linoleico y linolénico, con 0.84 y 0.05 g, respectivamente (Ortega *et al.*, 2004). El huevo posee también una importante variedad de vitaminas y minerales (Ortega *et al.*, 2004), como se ilustra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Micronutrientes contenidos en el huevo (por huevo entero de 60g).

| Vitaminas  |       |
|--|-------|
| Vitamina A - Eq. de Retinol ( $\mu\text{g}$ )          | 118.0 |
| Retinol ( $\mu\text{g}$ )                              | 117.0 |
| Carotenoides - Eq. $\beta$ -caroteno ( $\mu\text{g}$ ) | 5.2   |
| Vitamina B1 - Tiamina (mg)                             | 0.06  |
| Vitamina B2 - Riboflavina (mg)                         | 0.19  |
| Vitamina B3 - Eq. de Niacina (mg)                      | 1.7   |
| Vitamina B5 - Pantoteico (mg)                          | 0.94  |
| Vitamina B6 (mg)                                       | 0.06  |
| Vitamina B8 - Biotina ( $\mu\text{g}$ )                | 15.0  |
| Vitamina B9 - Eq. Folato dietético ( $\mu\text{g}$ )   | 26.7  |
| Vitamina B12 ( $\mu\text{g}$ )                         | 1.1   |
| Vitamina C (mg)  | 0.0   |
| Vitamina D ( $\mu\text{g}$ )                           | 0.94  |
| Vitamina E - Eq. $\alpha$ -tocoferol (mg)              | 0.99  |
| Vitamina K ( $\mu\text{g}$ )                           | 4.6   |
| Minerales  |       |
| Calcio (mg)  | 29.3  |
| Fósforo (mg)   | 113.0 |
| Hierro (mg)  | 1.1   |
| Iodo ( $\mu\text{g}$ )                                 | 6.6   |
| Cinc (mg)  | 1.0   |
| Magnesio (mg)  | 6.3   |
| Sodio (mg)   | 75.2  |
| Potasio (mg)   | 76.7  |
| Manganeso (mg)   | 0.04  |
| Cobre (mg)   | 0.03  |
| Selenio ( $\mu\text{g}$ )                              | 5.2   |

(Ortega *et al.*, 2004)

Es importante resaltar que el huevo es una fuente importante de colina, sólo por detrás del hígado vacuno. La colina es un vitaminoide que actúa como precursor en el cerebro para la síntesis de acetilcolina (Zeisel, 2000), un neurotransmisor importante para la funcionalidad de segmentos cerebrales, como el hipocampo y el cerebelo, involucrados en la memoria y el aprendizaje (Craciunescu *et al.*, 2003). Además de los atributos nutricionales del huevo, se puede destacar su bajo costo, que en conjunto hacen que el huevo sea un alimento clave y de fácil acceso económico para la nutrición adecuada de los mexicanos.

### **2.2.2 Proteínas del huevo**

Las proteínas del huevo están constituidas principalmente por tres fracciones proteicas: una albúmina cristizable llamada ovoalbúmina, una albúmina no cristizable llamada conalbúmina, y una proteína no coagulable llamada ovomucoide (Fevold, 1951). Estas proteínas se encuentran distribuidas en la yema (32%) y en la clara (60%) del huevo.

La yema tiene una membrana en forma de cubierta que la protege y evita que se mezcle con la clara de huevo. La yema está conformada principalmente por agua (50%), proteína (16%), lípidos (33%) y carbohidratos (1%). Además, la yema contiene 1% de carotenoides, mismos que le otorgan el color amarillo (Stadelman y Cotterill, 2001). Por otro lado la clara de huevo está compuesta principalmente por agua (88%) y proteínas (11%) (Kovacs-Nolan *et al.*, 2005). La ovoalbúmina es la proteína más importante de la clara de huevo, ya que representa el 54% del total de las proteínas de la clara de huevo (Ortega *et al.*, 2004). La composición de aminoácidos de la ovoalbúmina es de mayor calidad en comparación con otras proteínas contenidas en el huevo (Nisbet *et al.*, 1981).

### **2.2.3 Producción de huevo**

El huevo es un producto muy popular en la dieta de los mexicanos, de tal manera que México es el 5° productor de huevo a nivel mundial, solo detrás de China, Estados Unidos, Japón y Rusia, con una producción 2 millones 318 mil toneladas de huevo en el año 2012. (FAO, 2013). Por otro lado, en los últimos 20 años la producción de huevo en México se ha incrementado 164%, lo que pone en evidencia que la industria del huevo continúa en constante crecimiento (Tabla 2).

**Tabla 2.** Producción anual de huevo en México.

|                           | Año       |           |           |           |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                           | 2003      | 2008      | 2013      | 2018      |
| Producción de huevo (ton) | 1,872,532 | 2,337,215 | 2,516,094 | 2,931,593 |

SIAP, 2018

La producción de huevo en México tiene dos claros líderes productores por área geográfica, los cuales son Jalisco y Puebla; entidades que aportan el 54.7 y el 17.7%, respectivamente (SIAP, 2018). En la Tabla 3 se presentan las 4 principales entidades productoras de huevo en México.

**Tabla 3.** Principales productores de huevo en México.

| Estados         | 2018               |
|-----------------|--------------------|
|                 | Toneladas de huevo |
| Jalisco         | 1,583,893          |
| Puebla          | 505,535            |
| Sonora          | 141,264            |
| San Luis Potosí | 98,827             |

SIAP, 2018

Por mucho, el productor número uno en México es el estado de Jalisco, el cual fácilmente triplica la producción de su competidor más cercano, Puebla. Oaxaca no aparece dentro de las primeras veinte posiciones de producción al tener una producción de 6, 583 toneladas de huevo en 2018 (SIAP, 2018), equivalente a sólo un 0.22% de la producción nacional. Debido a esto, la demanda de huevo del estado de Oaxaca la cubre principalmente Puebla, su vecino geográfico y 2° productor a nivel nacional. Considerando lo anterior, la producción y venta de huevo en el estado de Oaxaca representa un gran potencial de negocio en la región.

### 2.3 Gallinas de postura (Hy-Line w36)

Existen dos variedades de gallinas dependiendo de la aplicación industrial. Las gallinas de engorda destinadas a la producción de carne y las gallinas ponedoras, destinadas a la producción de huevo. Estas últimas ya han sido ampliamente estudiadas, incluso a un nivel

genético con el objetivo de obtener los mejores rendimientos productivos. Entre las líneas genéticas más utilizadas a nivel mundial se encuentran las denominadas gallinas ligeras; Lohmann, Leghorn (Hy Line), De Kalb, Shaver. Para este proyecto avícola se seleccionó a la gallina ligera Hy-line w36 (Figura 2), la cual es una gallina con características reproductivas mejoradas a través de la selección genética, una alta adaptabilidad a los cambios de climas y un alto rendimiento de producción de huevos con relación al consumo de alimento. Los datos e información mencionados en este apartado fueron obtenidos del informe técnico del proveedor de gallinas de postura Hy-Line w36, (Hy-Line International, 2016). A partir de estos informes se tomaron en cuenta los requerimientos nutricionales de las gallinas Hy-line w36, para el desarrollo y producción de huevo.

Actualmente en la avicultura comercial se aplican programas de postura de un solo ciclo, que por lo general duran desde las 17 hasta las 85 a 90 semanas de edad de las gallinas (etapa de producción de huevo). Este programa de postura presenta menos desafíos y mayores rendimientos de producción de huevo, comparado con los programas de postura de dos ciclos, al no incluir la etapa de muda de plumas, debido a que esta etapa representa un periodo de 3 a 4 semanas de paro en la producción de huevo entre el primero y segundo ciclo. Entre las mejoras que conlleva el uso de estas gallinas para la producción de huevo se tiene el alargamiento del periodo de postura, lo que a su vez vuelve obsoleta la forma tradicional de producir huevo mediante el uso de dos ciclos de postura y un ciclo intermedio de desplume.



**Figura 2.** Ejemplar Hy-Line w36 de 6 semanas de edad (Hy-Line International, 2013).

El impacto de la ingeniería genética en aves de postura comerciales como la línea Leghorn y especialmente en la Hy-Line w36, ha permitido desarrollar sistemas animales robustos de producción de huevos con altos rendimientos. Algunos de los aspectos más relevantes en la productividad de estas líneas de gallinas son: bajo apetito, 98 g/día por ave; alta producción, 426 huevos a las 90 semanas; altas tasas de conversión kg alimento/kg huevo, 1.8; huevos de buen tamaño, 65g aproximadamente; y disminución de la mortalidad de las gallinas (Hy-Line International, 2013). A estos atributos podemos agregar la capacidad de estas aves para efectuar un segundo ciclo de postura con excelentes rendimientos productivos.

### **2.3.1 Requerimientos nutricionales**

Como se comentó en el apartado anterior las gallinas ponedoras Hy-Line w36 han sido ampliamente usadas a nivel mundial para la producción de huevos por su alto rendimiento productivo. Debido a esto la formulación de la mayoría de los alimentos balanceados para gallinas de postura en general está basada en el cumplimiento de las necesidades nutricionales y energéticas de esta línea de aves comerciales. Se han reportado los requerimientos nutricionales y energéticos de las gallinas Hy-Line w36 para las 3 etapas de crecimiento; iniciación, desarrollo y postura (Hy-Line International, 2013). Para lograr un mayor número de huevos producidos (426 huevos a las 90 semanas), una madurez temprana completa y una producción extendida de la postura, las pollitas y las gallinas deben recibir una nutrición adecuada, de acuerdo a lo estipulado por el proveedor (Anexo 1). A continuación se describen las necesidades nutricionales y energéticas de las gallinas para cada etapa de su vida.

#### Etapa de iniciación

Esta etapa abarca de la semana 0 a la semanas 6 de las pollitas y es una etapa en la que se determina la homogeneidad de la parvada. Los requerimientos nutricionales para esta etapa se enlistan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Composición recomendada de nutrientes para polluelas de 0 a 3 y de 3 a 6 semanas (Hy-Line International, 2013).

| Nutrición   | Semanas de edad |             |
|---|-----------------|-------------|
|   | 0 – 3           | 3 – 6       |
| Energía metabolizable<br>(kcal/kg)                            | 2977-3087       | 2977-3087   |
| Aminoácidos digestibles ideales / Aminoácidos totales % (m/m) |                 |             |
| Lisina  | 1.05 / 1.15     | 0.98 / 1.07 |
| Metionina   | 0.47 / 0.51     | 0.44 / 0.47 |
| Metionina+Cistina   | 0.74 / 0.83     | 0.74 / 0.83 |
| Treonina  | 0.69 / 0.82     | 0.66 / 0.77 |
| Triptófano  | 0.18 / 0.21     | 0.18 / 0.21 |
| Arginina  | 1.12 / 1.21     | 1.05 / 1.13 |
| Isoleucina  | 0.74 / 0.79     | 0.71 / 0.76 |
| Valina  | 0.76 / 0.83     | 0.73 / 0.80 |
| Proteína cruda  | 20.00           | 18.25       |
| Calcio  | 1.00            | 1.00        |
| Fósforo (disponible)  | 0.50            | 0.49        |
| Sodio   | 0.18            | 0.17        |
| Cloro   | 0.18            | 0.17        |
| Ácido linoléico (C18:2 n-6)                                   | 1.00            | 1.00        |

La etapa de iniciación consta de dos sub-etapas de 0 a 3 y de 3 a 6 semanas de vida. Sin embargo, en los programas de alimentación avícola no se suele hacer una distinción marcada entre estas sub-etapas, y se les incluye en una misma etapa promediando las 3 sub-etapas, debido a que sus valores nutricionales no varían de manera significativa de una sub-etapa a otra.

#### Etapa de desarrollo

La etapa de desarrollo abarca de las 6 a las 17 semanas de vida de las gallinas y es una etapa determinante en la formación de los huesos de las aves, especialmente la caja torácica. Este desarrollo es fundamental para obtener huevos del peso deseado (65 g aproximadamente). En la Tabla 5 se enlistan los requerimientos nutricionales para esta etapa (Hy-Line International, 2013).

**Tabla 5.** Composición recomendada de nutrientes para la etapa de desarrollo de las gallinas de 6 a 17 semanas de edad (Hy-Line International, 2013).

| Nutrición  | Semanas de edad |             |             |
|--|-----------------|-------------|-------------|
|  | 6 – 12          | 12 – 15     | 15 – 17     |
| Energía metabolizable (kcal/kg)  | 2977-3087       | 2977-3131   | 2911-2955   |
| Aminoácidos digestibles ideales estandarizados / Aminoácidos totales % (m/m) |                 |             |             |
| Lisina   | 0.88 / 0.96     | 0.76 / 0.83 | 0.78 / 0.85 |
| Metionina  | 0.40 / 0.44     | 0.36 / 0.38 | 0.38 / 0.41 |
| Metionina+Cistina  | 0.67 / 0.75     | 0.59 / 0.67 | 0.66 / 0.74 |
| Treonina   | 0.60 / 0.70     | 0.52 / 0.62 | 0.55 / 0.64 |
| Triptófano   | 0.17 / 0.20     | 0.15 / 0.18 | 0.16 / 0.20 |
| Arginina   | 0.94 / 1.01     | 0.81 / 0.87 | 0.83 / 0.90 |
| Isoleucina   | 0.65 / 0.70     | 0.57 / 0.61 | 0.62 / 0.67 |
| Valina   | 0.69 / 0.76     | 0.61 / 0.67 | 0.66 / 0.73 |
| Proteína cruda   | 17.5            | 16.00       | 16.50       |
| Calcio   | 1.00            | 1.00        | 2.50        |
| Fósforo(disponible)  | 0.47            | 0.45        | 0.48        |
| Sodio  | 0.17            | 0.18        | 0.18        |
| Cloro  | 0.17            | 0.18        | 0.18        |
| Ácido linoléico (C18:2 n-6)  | 1.00            | 1.00        | 1.00        |

La etapa de desarrollo consta de tres sub-etapas como se indica en la Tabla 5. Sin embargo en la práctica avícola no se hace una distinción marcada entre ellas y se considera un promedio entre las tres sub-etapas, debido a que los valores nutricionales no varían de manera significativa de una sub-etapa a otra. Las dietas dadas a las pollitas previas al pico de producción (de 6 a 17 semanas de vida) están formuladas para cumplir con los requerimientos energéticos de las aves, con el fin de generar reservas de nutrientes y glucógeno para el periodo de producción (Hy-Line International, 2013).

#### Etapa de postura

La etapa de postura abarca de la semana 18 a la 90 de las gallinas. En esta etapa se lleva a cabo la producción de huevo. Si las necesidades nutricionales de las gallinas no son satisfechas, la producción de huevo puede disminuir de manera importante. Por otro lado, el exceso de nutrientes, especialmente de proteína, hace que las gallinas generen heces más

líquidas, lo que puede contaminar el huevo de *Salmonella*. Los requerimientos nutricionales para esta etapa se enlistan en la Tabla 6 (Hy-Line International, 2013).

**Tabla 6.** Composición recomendada de nutrientes para la etapa de postura de las gallinas de 18 a 90 semanas de edad (Hy-Line International, 2013).

|   | Semanas de edad |             |             |             |             |
|---|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   | 18 – 37         | 37 – 48     | 48 – 60     | 60 – 76     | 76 – 90     |
| Energía metabolizable (kcal/kg)                               | 2844-2955       | 2844-2944   | 2822-2922   | 2800-2844   | 2778-2822   |
| Aminoácidos digestibles ideales / Aminoácidos totales % (m/m) |                 |             |             |             |             |
| Alimento g/día ave  | 84              | 96          | 100         | 94          | 93          |
| Lisina  | 0.96 / 1.05     | 0.78 / 0.86 | 0.71 / 0.78 | 0.74 / 0.81 | 0.73 / 0.80 |
| Metionina   | 0.47 / 0.50     | 0.38 / 0.41 | 0.35 / 0.37 | 0.36 / 0.38 | 0.35 / 0.38 |
| Met+Cistina   | 0.81 / 0.91     | 0.66 / 0.74 | 0.60 / 0.67 | 0.62 / 0.68 | 0.60 / 0.68 |
| Treonina  | 0.67 / 0.79     | 0.55 / 0.64 | 0.50 / 0.58 | 0.52 / 0.61 | 0.51 / 0.60 |
| Triptófano  | 0.20 / 0.24     | 0.16 / 0.20 | 0.15 / 0.18 | 0.16 / 0.19 | 0.15 / 0.18 |
| Arginina  | 1.00 / 1.07     | 0.81 / 0.87 | 0.74 / 0.79 | 0.77 / 0.83 | 0.76 / 0.82 |
| Isoleucina  | 0.75 / 0.80     | 0.61 / 0.66 | 0.55 / 0.60 | 0.58 / 0.62 | 0.57 / 0.61 |
| Valina  | 0.84 / 0.93     | 0.69 / 0.76 | 0.62 / 0.69 | 0.65 / 0.72 | 0.64 / 0.71 |
| Proteína cruda  | 19.05           | 16.15       | 15.25       | 15.96       | 15.86       |
| Sodio   | 0.21            | 0.19        | 0.18        | 0.19        | 0.19        |
| Cloro   | 0.21            | 0.19        | 0.18        | 0.19        | 0.19        |
| Ácido Linoléico (C18:2 n-6)                                   | 1.19            | 1.04        | 1.00        | 1.06        | 1.08        |
| Colina, mg/día  | 0.10            | 0.10        | 0.10        | 0.10        | 0.10        |

La etapa de desarrollo consta de cinco sub-etapas como se indica en la tabla 6. Sin embargo, al igual que en los casos anteriores en la práctica avícola no se hace una distinción marcada entre ellas y se considera una sola etapa promedio, debido a que los valores nutricionales no varían de manera significativa de una sub-etapa a otra. En la etapa de producción se debe dar especial atención al suministro de calcio, dado que este es uno de los nutrientes más importantes para la producción del huevo; especialmente para la cáscara del huevo, que junto con las membranas que recubren el contenido del huevo constituye el 10% del huevo entero.

La cáscara del huevo se encuentra constituida principalmente por una matriz cálcica rodeada por pequeñas cantidades de proteína y mucopolisacáridos. En el cascarón también podemos encontrar trazas de otros minerales como sodio, magnesio, zinc, manganeso,

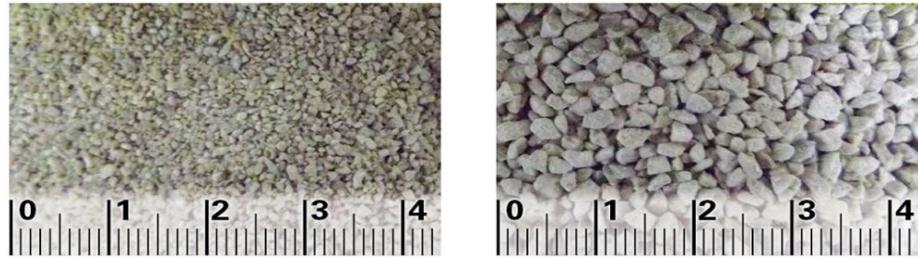
hierro, cobre, aluminio y boro (Sastre *et al.*, 2003). En la Tabla 7 se muestra las cantidades y tamaño de partícula de calcio y fósforo a suministrar en las diferentes etapas de vida de las gallinas ponedoras (Hy-Line International, 2013).

**Tabla 7.** Cantidad de calcio y fósforo requerido en la dieta de las gallinas previo y durante la postura (Hy-Line International, 2013).

| <b>Los cambios en el tamaño de las partículas de calcio fósforo y piedra caliza se basan en la edad</b> |       |        |         |         |         |         |         |
|---|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Semana  | 0 – 6 | 6 – 16 | 17 – 37 | 38 – 48 | 49 – 62 | 63 – 76 | 76 – 90 |
| Calcio g/día  | 1     | 1      | 4.15    | 4.30    | 4.40    | 4.50    | 4.65    |
| Fósforo (disponible) mg/día   | 0.5   | 0.46   | 485     | 470     | 450     | 400     | 380     |
| Tamaño de las partículas de calcio (fino : grueso)  | 100:0 | 50:50  | 50:50   | 45:55   | 40:60   | 35:65   | 35:65   |

En la etapa de iniciación el calcio debe ser suministrado a las pollitas en forma de partículas menores a 2 mm. En la etapa de desarrollo, y en la dieta de postura hasta 37<sup>a</sup> semana, el calcio se debe suministrar en proporciones de 50 : 50 (%), en partículas menores a 2 mm y de 2 a 4 mm, (Figura 3). Esto último con el fin de evitar cualquier problema que pueda ocasionar el suministro en exceso de este componente.

Las deficiencias en el suministro de calcio, vitamina D y fosfato, pueden generar padecimientos de las aves como la osteomalacia, mejor conocida como “hueso suave”. Las gallinas que desarrollan este padecimiento son fácilmente identificadas por cojera o modo de andar anormal. Estas gallinas presentarán en las primeras posturas poca productividad y producirán cascarones con calidad deficiente, ya que su acumulación de masa ósea es deficiente.



**Figura 3.** Gránulos de calcio fino de 0 a 2 mm (izquierda) y de calcio grueso 2 a 4 mm (derecha) (Hy-Line International, 2016).

### **2.3.2 Importancia de la proteína en la dieta de gallinas ponedoras**

En la formulación de un alimento balanceado se deben incorporar ingredientes con un correcto balance de macronutrientes (proteína, carbohidratos y lípidos) y micronutrientes (vitaminas y minerales). En el caso particular de la alimentación de gallinas ponedoras de huevo, se debe conservar un balance de aminoácidos adecuado que permita obtener huevo con la productividad adecuada y con alta calidad proteica. Adicionalmente al suministro proteico, es necesario que el alimento balanceado cubra las necesidades energéticas de las gallinas. Esto se hace en la industria de alimentos balanceados mediante la adición de maíz amarillo a la formulación que sirve a las gallinas como fuente de carbohidratos (energía).

En el desarrollo y producción de huevo a partir de gallinas ponedoras se distinguen tres etapas de requerimientos de aminoácidos esenciales, las cuales se enlistan en las Tablas 4, 5 y 6. La Tablas 4 y 5 muestran el balance de aminoácidos requeridos para el crecimiento y desarrollo de las pollitas para las etapas de iniciación (semanas 0 a 6) y desarrollo (semanas 6 a 17) (Hy-Line International, 2013). En las etapas previas a la postura, específicamente en las primeras semanas (semanas 0 a 6) de vida de las pollitas, se debe considerar un aporte de proteína en exceso debido a que en esta etapa se requiere la mayor tasa de crecimiento posible. En las etapas posteriores a la tercera semana pero antes de la postura (semana 17), los requerimientos proteicos disminuyen.

Finalmente, durante la etapa de producción de huevo, la ingesta proteica de las gallinas se eleva nuevamente; esto debido a que en esta etapa la ingesta proteica debe satisfacer las necesidades metabólicas de la gallina, y además debe sustentar la producción de huevo. En esta etapa se debe poner especial atención en suministrar el balance de aminoácidos

adecuado de acuerdo a las necesidades de las gallinas Hy-Line w36, como se muestra en la Tabla 6 (Hy-Line International, 2013).

El exceso o carencia de proteínas suministradas en la dieta tiene repercusiones negativas en la productividad de las gallinas. En estudios recientes se ha reportado que la disminución de la fuente proteica, causó efectos negativos en la producción de huevo, peso del huevo, masa diaria del huevo y color de la yema (Gilani *et al.*, 2013).

Hiramoto *et al.* (1990) reportaron el efecto de las deficiencias de metionina y lisina en la alimentación de las gallinas, sobre la síntesis de proteínas en el hígado, el oviducto y en todo el cuerpo de las gallinas ponedoras. La síntesis de proteínas en el hígado, el oviducto se redujo por una diferencia dietética de los aminoácidos estudiados con mayores tasas de disminución que para el análisis de cuerpo completo en una relación 36 y 50%. La deficiencia de lisina y metionina afecta de manera más severa a la síntesis de proteína en el hígado y el oviducto lo que merma de manera directa la producción de huevos, antes de disminuir la síntesis de proteína en el resto del cuerpo y afectar las funciones fisiológicas de las gallinas ponedoras.

Por otra parte, Poosuwan *et al.* (2010), estudiaron el efecto de la alimentación a largo plazo de los niveles de proteína en la dieta sobre la producción de huevos, la respuesta inmunológica y los aminoácidos plasmáticos de gallinas ponedoras en condiciones subtropicales. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de los niveles de proteínas sobre el rendimiento de la producción, la respuesta inmune. Dos grupos de gallinas comerciales (Babcock B-308) fueron alimentados con dietas con diferentes niveles de proteína cruda (14 y 18%). La dieta alta en proteínas (18%) aumentó significativamente el rendimiento de producción, la ingesta de aminoácidos esenciales y el porcentaje del peso corporal, con respecto a la dieta baja en proteína (14%). Por lo tanto este estudio sugiere un suministro adecuado de aminoácidos para la dieta de gallinas ponedoras.

## **2.4 Alimentos balanceados para gallinas de postura**

### **2.4.1 Definición de alimentos balanceados**

Los alimentos balanceados están caracterizados por aportar los nutrientes necesarios (macro y micronutrientes) para el desarrollo, manutención y producción de la especie animal para la cual estos alimentos son dirigidos. De acuerdo al Servicio Nacional de Sanidad y Calidad

Agroalimentaria en Chile (AAFCO, 2000) un alimento balanceado es “un alimento que aporta la nutrición adecuada destinada a animales y está preparado para ser consumido como única ración y ser capaz de mantener con vida y/o promover la producción sin que sea necesario proporcionar ninguna sustancia adicional, excepto agua”.

#### **2.4.2 Alimentos balanceados elaborados por pequeños productores**

Oaxaca se encuentra entre los estados con menor producción de huevo, estos estados en conjunto aportan el 29% de la producción nacional. La producción de Oaxaca se puede considerar de traspatio; más bien su producción puede ser clasificada como de traspatio. En esta forma de crianza, los productores utilizan piensos mixtos para la alimentación de las gallinas, que consisten en combinaciones de cereales como maíz, sorgo o maicillo mezclados con leguminosas, sales minerales y cascarones de huevo como fuente de calcio (FAO, 2005). Para la orientación de estos pequeños productores, la FAO en coordinación con Secretaría de Agricultura, Ganadería de Chile, la Agencia Española de Cooperación Internacional y el Proyecto Especial para la Seguridad Alimentaria de Honduras, han publicado documentos divulgativos, donde se ofrece orientación a los productores para mejorar la nutrición y el cuidado de las gallinas de postura a un nivel doméstico o de pequeña escala (FAO, 2005).

#### **2.4.3 Alimentos balanceados para granjas industriales**

En la actualidad la producción de huevo a nivel industrial se encuentra en un punto de avance tecnológico en el que se tienen plenamente caracterizadas las aves de postura y los requerimientos nutricios para estas gallinas. Las empresas productoras de huevos basan la alimentación de sus gallinas en la información proporcionada por los productores de aves. Dentro de las principales compañías productoras de huevo de México se encuentran las siguientes: Proteína animal (PROAN), Industrias Bachoco, El Calvario, Empresas Guadalupe y Gena Agropecuaria con 33.0, 12.2, 10.0, 10.0 y 8.0 millones de aves ponedoras en reproducción, respectivamente (Industrias Avícolas, 2018). Estas compañías de producción de huevo producen el alimento balanceado para sus gallinas mediante una mezcla de cereales y aditivos que cubren las necesidades nutricionales de sus líneas de gallinas ponedoras.

#### **2.4.4 Principales fuentes proteicas utilizadas en alimentos balanceados comerciales**

Para la elaboración de alimentos balanceados para animales se utilizan las proteínas de origen vegetal debido principalmente al bajo costo de éstas. Dentro de los alimentos vegetales con mayor contenido proteico se encuentran las semillas de girasol, soya, frijol, garbanzo y lentejas con contenido de proteína de 22.5, 36.5, 22.6, 18.2 y 24%, respectivamente (FAO, 1995). Sin embargo, estas proteínas tienen una desventaja en comparación con las proteínas de origen animal, debido a que en general carecen de uno o más aminoácidos esenciales requeridos en la dieta de las gallinas ponedoras, con excepción de la soya, la cual contiene todos los aminoácidos esenciales.

Debido a esto, la soya es la principal fuente de proteínas utilizada para la elaboración de alimentos balanceados con contenidos de 2.3% de lisina y 0.59% de metionina (Carrera *et al.*, 2011), cantidades que no satisfacen del todo las necesidades nutricionales de estos aminoácidos de las gallinas ponedoras (0.86 y 1.14%, respectivamente) (Hy-Line International, 2013). Estos aminoácidos son los más limitantes en el caso de las proteínas de origen vegetal; por lo que con frecuencia agrega una fuente independiente de metionina+cisteína. Sumado a lo anterior se debe tomar en cuenta que la necesidad de importación de la soya también incrementa el costo de los alimentos balanceados. Considerando lo anterior, existe la necesidad de utilizar fuentes de proteína alternativas para la elaboración de alimentos balanceados.

#### **2.5 Fuentes proteicas alternativas potenciales para la elaboración de alimentos balanceados**

Existen algunas fuentes proteicas poco utilizadas en la elaboración de alimentos balanceados para gallinas de postura, debido a factores como la poca disponibilidad o su elevado precio de adquisición. Por ejemplo la harina de pescado a pesar de su buen balance de aminoácidos, se caracteriza por su elevado costo de adquisición (Indexmundi, 2020) comparado con la soya que es la fuente de proteína más utilizada para la elaboración de alimentos balanceados para gallinas ponedoras. En los últimos años han surgido nuevas fuentes de proteína como insectos, macroalgas, colza, moringa (Olugbemi *et al.*, 2010) y también pseudocereales como la quínoa (Hy-Line International, 2013) y el huauzontle.

Los insectos son una fuente importante de proteínas y grasas, por lo que pueden constituir una fuente alternativa de proteína y un posible sustituto de la soya. Sin embargo, aún se requiere de investigación para desarrollar e industrializar la crianza y la cosecha de insectos comestibles para lograr que esta fuente proteica sea rentable, energéticamente eficiente y microbiológicamente segura para garantizar la seguridad de los piensos (Rumpold y Schluter, 2013).

Por otro lado, el uso óptimo de macroalgas en los alimentos requiere un procesamiento adecuado, y los enfoques de biorrefinería pueden aumentar el contenido de proteínas y mejorar la disponibilidad de nutrientes. Oveland *et al.* (2018) reportaron que una especie de macroalgas verdes (*Ulva lactuca*) es rica en proteínas y tiene potencial como fuente alternativa de proteínas en la alimentación animal. En el estudio se reporta que la incorporación de 40 g/kg de macroalga verde (*U. lactuca*) seca (231 g/kg de proteína cruda) a un alimento balanceado no tuvo diferencias significativas en la tasa de crecimiento, ni en el consumo de alimento o tasa de conversión alimenticia (Oveland *et al.*, 2018).

A pesar de que estas fuentes alternativas contienen cantidades importantes de proteínas los principales obstáculos para su utilización a mayor escala es la rentabilidad de los procesos de producción así como la calidad del perfil de aminoácidos. En la mayoría de los casos estas fuentes proteicas alternativas resultan ser poco viables económicamente, por lo que son poco competitivas.

## **2.5.1 Suero lácteo**

### *2.5.1.1 Origen*

El suero lácteo es un subproducto de la industria quesera, que contiene proteínas solubles que no son precipitadas en la cuajada de la leche durante la elaboración del queso. El contenido de sólidos en el lactosuero es muy variable y depende del proceso de elaboración del queso, que a su vez varía de un productor a otro. Existen diferentes procedimientos para la producción de queso, de los cuales se derivan principalmente dos variantes de lactosuero (Alais, 1988).

El proceso enzimático consiste en la precipitación de la caseína mediante proteólisis enzimática, utilizando enzimas comerciales como renina o pepsina que generan un suero lácteo dulce, con una acidez de entre 0.07 y 0.12% de ácido láctico (PROY-NMX-F-721-

COFOCALEC, 2012). Por otra parte, se tiene el procedimiento ácido, en el cual la caseína se precipita por medio de la adición de ácidos comerciales como ácido acético, cítrico o láctico. Este proceso da como resultado la obtención de un suero ácido, con una acidez de 0.12% o más de ácido láctico (PROY-NMX-F-721-COFOCALEC, 2012). Para la elaboración del alimento balanceado para gallinas ponedoras desarrollado en este proyecto se utilizará un suero lácteo de tipo ácido, proveniente de un proceso ácido de la industria quesera.

### 2.5.1.2 Características y generalidades

En general el lactosuero se ha tratado como un desecho del proceso de producción de queso, lo que puede constituir un riesgo para el ecosistema, debido a su elevado contenido de nutrientes, cercano al 50% de nutrientes de la leche original (Bylund, 1995). El suero lácteo representa aproximadamente el 90% del volumen de leche empleado en la fabricación de queso, por lo que el aprovechamiento y reutilización de este subproducto constituye no sólo una necesidad ambiental sino también una oportunidad de negocio. En la actualidad se conocen ampliamente las propiedades nutrimentales del lactosuero, y se han llevado al mercado productos a base de suero lácteo, como suplementos proteicos para deportistas (Optimum nutrition, 2019).

### 2.5.1.3 Composición

La composición del lactosuero depende en gran medida del proceso de elaboración del queso. Los valores permitidos de los parámetros fisicoquímicos del lactosuero de acuerdo al proyecto de norma mexicana PROY-NMX-F-721-COFOCALEC (2012) se presenta en la Tabla 8. En esta tabla se puede notar que el suero lácteo contiene una cantidad importante de lactosa y de proteínas.

**Tabla 8.** Componentes fisicoquímicos del suero lácteo.

| Componentes     | % (m/v) en suero pasteurizado      |
|-----------------|------------------------------------|
| Proteínas       | 0.72 min                           |
| Grasa           | 0.10 máx                           |
| Lactosa         | 4.7 min                            |
| Cenizas         | 0.53 min                           |
| pH              | 6.4 – 6.7 s. dulce, < 6.4 s. Acido |
| Densidad (g/mL) | 1.023 – 1.026                      |

min = mínimo y máx = máximo

De las proteínas presentes en el suero lácteo se encuentran principalmente la  $\beta$ -lactoglobulina y la  $\alpha$ -lactoalbúmina. Estas proteínas contienen una proporción alta de aminoácidos de cadena ramificada de 26% (Bos *et al.*, 2000). Entre los aminoácidos más abundantes del lactosuero están los siguientes; ácido glutámico, ácido aspártico, leucina y lisina (Hall *et al.*, 2003). Este último aminoácido es de particular importancia en este proyecto, debido a que la lisina es uno de los aminoácidos más importantes para el desarrollo de las gallinas, así como para la etapa de producción de huevo. La leucina por su parte tiene importancia particular en la formación de proteínas musculares (Anthony *et al.*, 2001), por lo que resulta importante en la etapa de iniciación de las pollitas. El suero lácteo también contiene cantidades importantes de lactosa las cuales pueden afectar de manera negativa al proceso digestivo de las gallinas (Alloui *et al.*, 2013). Debido a esto, en este proyecto se pretende que el contenido de lactosa sea reducido considerablemente mediante procesos de filtración por membranas.

Oaxaca tiene una importante gastronomía basada en los productos lácteos. Tan solo en el año 2017, Oaxaca produjo 145,337,000 litros de leche (SIAP, 2017). En la industria quesera mexicana se utilizan aproximadamente 36,334,250 litros de leche al año, de los cuales el 90% (32,700,825) de este volumen es suero lácteo (SIAP, 2017). Según la SAGARPA, para la elaboración de queso fresco se utilizan 25% de la leche producida en México, siendo el suero lácteo en su mayoría desechado al medio ambiente.

#### 2.5.1.4 Estudios reportados

Aghaei *et al.* (2010) estudiaron el efecto de los componentes prebióticos (presentes en el lactosuero), así como de probióticos, en el rendimiento de gallinas ponedoras Hy-Line w36 y su flora intestinal. Los autores agregaron suero lácteo deshidratado en concentraciones de 0, 2.5, 5.0 y 7.0%, considerando dos niveles de adición de probióticos. La adición de lactosuero y probióticos en las dietas tuvo efectos positivos significativos ( $p < 0.05$ ) en la producción de huevo. Por otra parte la adición del probiótico (*Lactobacillus* spp.), también mejoro el peso y la masa del huevo, el grosor de cascaron y la dureza del cascaron.

Por otro lado, Pineda-Quiroga *et al.* (2017) evaluaron el efecto de la suplementación de lactosuero y *Pediococcus acidilactici* (probiótico) de manera individual y combinada en una dieta de maíz-soya. Los parámetros evaluados fueron el rendimiento productivo, la

calidad del huevo y el recuento microbiano fecal. La adición de lactosuero tuvo un impacto positivo en la producción de huevo, y causó una reducción de la concentración de *Clostridium* spp. en el recuento fecal; sin embargo produjo un aumento en el recuento fecal de *Bifidobacterium* spp. lo cual afecta la inocuidad del huevo.

En otro estudio, Shariatmadari y Fobes (2005) evaluaron el rendimiento de pollos de engorda alimentados, tanto de comer como de beber, con suero de leche. Se observó que cuando se ofreció suero como líquido para beber y suero en base sólida, el tratamiento tuvo un efecto negativo en los pollos, debido a la ausencia de lactasa en el tracto digestivo de éstos. Lo anterior muestra que la incorporación de suero lácteo en la dieta de las aves sin un tratamiento previo de deslactosado puede causar diarrea. Sin embargo, el suministro controlado de suero en el alimento de las aves podría evitar ese daño y ser de gran valor para los productores de queso, considerando la utilización de un desecho de la industria quesera en la producción de alimentos balanceados.

## **2.5.2 Huauzontle**

### *2.5.2.1 Origen y descubrimiento*

El huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*) es una especie nativa de México que junto al maíz era utilizado como moneda de cambio en el viejo mundo, y ofrecido como tributo por los indígenas, además de tener importancia religiosa en ceremonias de sacrificios humanos. El huauzontle es un pseudocereal de estrecha relación genética con la quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). El consumo y producción del huauzontle se vio mermando por la conquista española y la introducción de nuevos cereales como el trigo y el arroz en México (Safford, 1916).

### *2.5.2.2 Características y generalidades*

El huauzontle es una hierba erecta sin ramificaciones en su tallo, pero sí en la raíz; sus hojas son alternadas de forma triangular y sus flores son hermafroditas y unisexuales (Bol. Soc. Bot. México, 1993). La morfología es muy similar a la quinoa debido a la cercanía genética que comparten estas dos especies. Las plantas de huauzontle son capaces de soportar temperaturas por debajo del punto de congelación del agua por periodos cortos. El huauzontle tiene un sabor ligeramente amargo y es consumido en una amplia variedad de

platos mexicanos. Puede ser cocinado, capeado o sin capear, en caldillo de jitomate o en mole, relleno de queso, pay, tacos, con huevo, entre otros (Hernández-Valles, 2017).



**Figura 4.** Ejemplar de huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*).

Debido a su contenido de proteínas y carbohidratos, el cultivo de huauzontle es importante para la alimentación de los mexicanos. México produce 3,206 toneladas anuales de huauzontle en aproximadamente 291 hectáreas, siendo el estado de Puebla por mucho el principal productor, aportando 94% de la producción con 3,027 toneladas (SAGARPA, 2016). En este estado los principales municipios productores son Atlixco, Huaquechula, Santa Isabel Cholula, Tecali de Herrera, Chiautzingo y San Jerónimo Tecuanipan, con un valor aproximado de 2 mil 800 pesos por tonelada (SAGARPA, 2016).

#### 2.5.2.3 Estudios reportados

Monterrubio *et al.* (2020), caracterizaron el perfil de aminoácidos del huauzontle, así como su contenido de proteína, donde el contenido de proteína ( $20.4 \pm 0.3\%$ ) fue mayor que el reportado para quinoa de 12.6% (*Chenopodium quinoa* Willd), cultivo con el que el huauzontle comparte gran cercanía genética. Por otro lado, el contenido de aminoácidos esenciales reportado para el huauzontle fue muy superior comparado con el perfil de a.a. de la quinoa. Especialmente el contenido de lisina y metionina+cisteína, los aminoácidos limitantes en las proteínas de origen vegetal. Se reportó  $8.8 \pm 0.5\%$  y  $6.2 \pm 0.4\%$  de lisina y metionina+cisteína respectivamente (Ritva *et al.*, 2011).

Assad-Bustillos *et al.* (2014) caracterizaron el almidón de las semillas del huauzontle en función de parámetros reológicos, térmicos, funcionales y fisicoquímicos. Los autores obtuvieron una extracción de almidón con un rendimiento del 50% con una pureza del 72.5%. La proteína del huauzontle contenida en el almidón extraído representaba alrededor del

11%. En otro estudio, Lazo-Vélez *et al.* (2016) caracterizaron y cuantificaron la presencia de saponinas en semillas crudas y germinadas de huauzontle sometidas a estrés químico inducido por selenito de sodio. El análisis por cromatografía líquida reveló la presencia de 12 saponinas, principalmente ácido oleanólico y ácido fitolaccagénico, los cuales son anti-nutrientes que pueden afectar el desarrollo y producción de la gallina.

A pesar de los estudios realizados al presente acerca del huauzontle, se puede afirmar que la información científica acerca de esta planta autóctona mexicana aún es escasa. Esto constituye una gran área de oportunidad para los estudios científicos y tecnológicos relacionados a esta planta, como es el caso del presente trabajo.

## **2.6 Elaboración del alimento balanceado para gallinas de postura**

En general los procesos de elaboración de alimentos balanceados comienzan con el tratamiento de las materias primas. En este trabajo se utilizan dos materias primas como fuente proteica (lactosuero y semilla de huauzontle) y una como fuente de carbohidratos (maíz amarillo) para la elaboración del alimento balanceado. A continuación se describen los procesos usados en la ingeniería química para realizar dichos tratamientos.

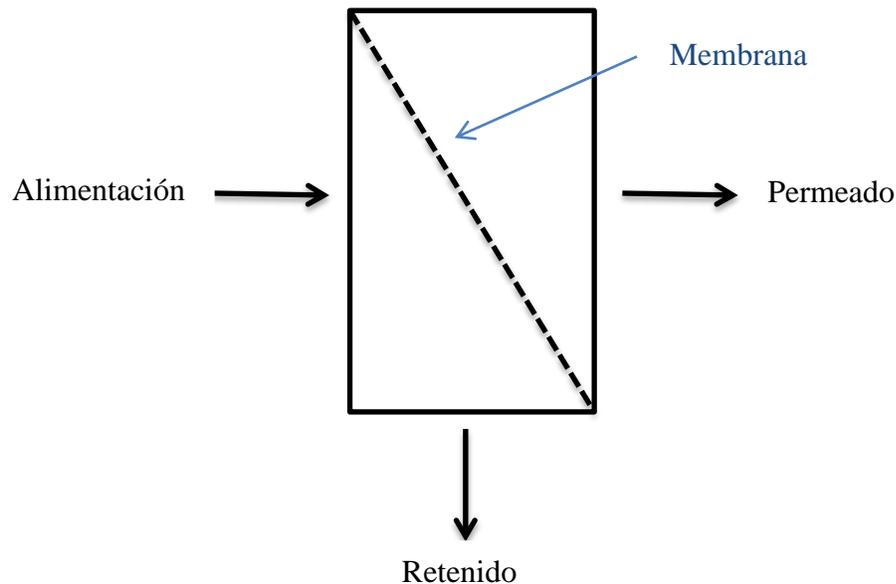
### **2.6.1 Obtención de concentrados proteicos de lactosuero en polvo**

El suero lácteo será tratado mediante dos procesos. Primero será sometido a un proceso de concentración mediante un sistema de filtrado por membranas, con el objetivo de disminuir significativamente la cantidad de agua y aumentar la concentración de sólidos del suero lácteo. Lo anterior ayuda a reducir la cantidad de alimentación que se utilizará en la subsecuente operación de secado por aspersión. El segundo tratamiento, secado por aspersión, se utiliza para deshidratar el concentrado de suero en forma de polvo (Hernández, 2017).

#### *2.6.1.1 Fundamentos de la filtración por membranas*

En las industrias alimentarias se emplean sistemas de membranas para la concentración de sólidos contenidos en una fracción líquida. Este proceso depende principalmente de dos factores: el tamaño de poro de la membrana y la configuración de flujo. Con base a lo anterior los sistemas de membranas se pueden clasificar en función del tamaño de poro en microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. Por otra parte, en función

del flujo, los sistemas de membrana se clasifican en flujo perpendicular y flujo tangencial, aunque el primero solo se utiliza a nivel laboratorio. Se pueden distinguir diversos procesos de membrana dependiendo del tamaño de poro de la membrana y la configuración de flujo, pero su fundamento de operación es el mismo. El proceso consta de una membrana selectiva y semipermeable ubicada en un módulo de membrana que recibe la alimentación. Posteriormente se aplica una diferencia de presión entre ambos lados de la membrana, para obtener dos fracciones resultantes a la salida del módulo de membrana: el retenido (fracción que no penetra la membrana) y el permeado o filtrado (fracción que penetra la membrana), Figura 5. Este proceso se clasifica según el tamaño de poro de la membrana en microfiltración y ultrafiltración, en las cuales se utilizan membranas con un tamaño de poro de 0.2 a 1  $\mu\text{m}$  y 5 y 500 kDa respectivamente.

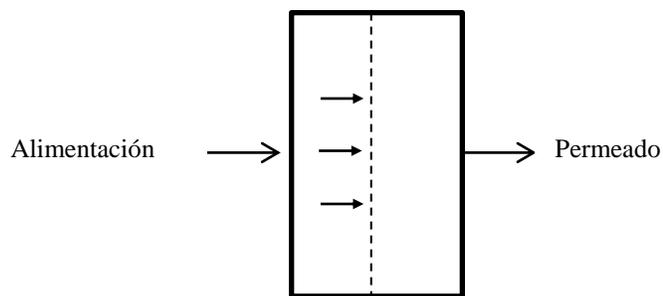


**Figura 5.** Diagrama básico del proceso de separación por membranas.

El tamaño de poro de la membrana determina los componentes que penetran a través de ella y los que son retenidos. Existe una amplia variedad de membranas, pero las más utilizadas son las membranas de cerámica y poliméricas; las primeras tienen un amplio rango de distribución de poros, lo que resulta en una mayor porosidad y a su vez en un mayor flujo de filtrado (Ciora y Liu, 2003). Las segundas también cuentan con un amplio rango de tamaño de poros y son populares debido a su bajo costo de adquisición.

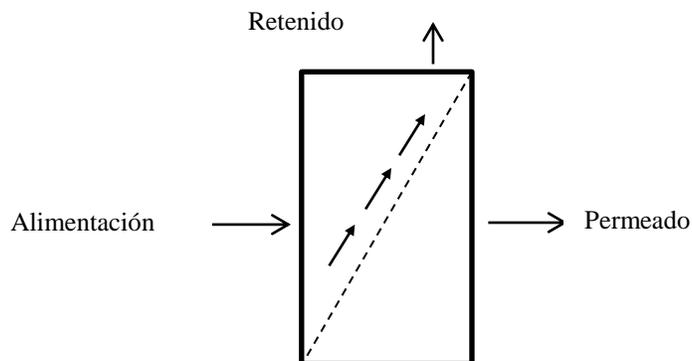
Como ya se mencionó, los procesos de filtración también se clasifican en función de la configuración del flujo de operación:

- a) Flujo perpendicular. El flujo de alimentación pasa de manera perpendicular a la membrana (Figura 6). En este tipo de flujo se forma una delgada película en la membrana que debe ser retirada para evitar el taponamiento de los poros y la obstrucción total de la membrana. Debido a la reducción considerable del flujo a medida que ocurre la filtración, el proceso es de tipo lote y termina cuando el flujo se reduce demasiado.



**Figura 6.** Diagrama del flujo perpendicular a través de una membrana.

- b) Flujo tangencial. El flujo de alimentación principal pasa de forma tangencial a la membrana (Figura 7). En esta configuración la velocidad de flujo y la presión son los parámetros de mayor importancia. Con el flujo tangencial se previene de taponamiento de las membranas por obstrucción de materia que ocurre en los sistemas de flujo perpendicular.

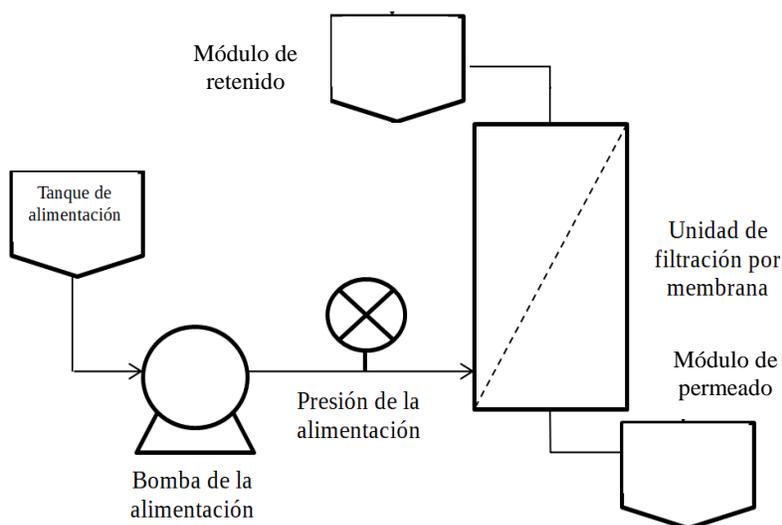


**Figura 7.** Diagrama de flujo tangencial a través de una membrana.

El filtrado por membranas es ampliamente utilizado en la industria láctea y de productos derivados, por su buena eficiencia en la concentración de los componentes de interés y la remoción de agua de la fracción de interés. Esta remoción de agua es cuantificada por el factor de concentración volumétrico (FCV). Una ventaja de este proceso es que no requiere un tratamiento térmico intensivo, como es el caso de la evaporación y la destilación, procesos que pueden ocasionar daños térmicos irreversibles a los productos de interés, principalmente a las propiedades sensoriales (Baldasso *et al.*, 2011).

#### 2.6.1.2 Proceso de concentración de proteínas por membranas

Para el correcto y eficiente funcionamiento del sistema de filtración por membranas se requiere un módulo de membrana o carcasa que contiene la membrana, una bomba peristáltica que proporciona la presión diferencial y el flujo volumétrico tangencial que permite la filtración, y las tuberías de permeado y de retenido (Mulder, 2012). Los componentes de los sistemas de membranas se ilustran en la Figura 8.



**Figura 8.** Componentes básicos de los sistemas de filtración por membranas.

Entre los procesos más usados para concentrar los sólidos y proteínas de la leche están la microfiltración y ultrafiltración con flujo tangencial. La microfiltración (MF) es un punto intermedio entre la filtración de torta convencional y la ultrafiltración. Las membranas

usadas en este proceso tienen poros desde aproximadamente 0.1 a 1.0  $\mu\text{m}$ , y la presión diferencial es pequeña. Este rango de tamaño de poro es utilizado para la remoción de la grasa del lactosuero, como una etapa de prefiltrado, antes de pasar el lactosuero desgrasado a la etapa de ultrafiltración. Esto debido a que en la ultrafiltración las moléculas de grasa pueden obstruir los poros de la membrana (Walstra *et al.*, 2006).

Por otra parte, en el proceso de ultrafiltración (UF) se separa efectivamente las macromoléculas del suero lácteo, entre las que se encuentran principalmente las proteínas. El tamaño de poro de las membranas de UF están en un rango entre 5 y 500 kDa (Jeantet *et al.*, 2005; Walstra *et al.*, 2006). Los procesos combinados de micro y ultrafiltración ayudan a aumentar la cantidad de sólidos totales y proteínas del suero lácteo, de esta manera reduciendo significativamente la cantidad de agua en el suero que será necesario evaporar en la etapa posterior de secado. Para caracterizar el proceso de separación en las operaciones de MF y UF se usa el factor de concentración de sólidos (FCs), el factor de concentración proteico (FCp) y el factor de concentración volumétrico (FCV), respectivamente, los cuales se definen a continuación.

$$\text{FCs} = \frac{\text{Concentración de sólidos inicial}}{\text{Concentración de sólidos final}} \quad (\text{Ec. 2.1});$$

$$\text{FCp} = \frac{\text{Concentración de proteína inicial}}{\text{Concentración de proteína final}} \quad (\text{Ec. 2.2});$$

$$\text{FCV} = \frac{\text{Volumen inicial}}{\text{Volumen final}} \quad (\text{Ec. 2.3}).$$

### 2.6.1.3 Obtención de polvos del lactosuero mediante secado por aspersión

El secado por aspersión es una tecnología ampliamente utilizada en la industria farmacéutica y de alimentos, por las características y calidad de los polvos obtenidos. En la actualidad este proceso se utiliza para la obtención de polvos de leche, de suero lácteo, de jugos, de productos naturales y de proteínas comestibles. El equipo de secado consta de 4 componentes principales (Figura 9): 1) sistema de calefacción del aire de secado; 2)

sistema de atomización de la alimentación líquida; 3) cámara de secado; y 4) sistema de recolección de polvos (Checa Peralta, 2013).



**Figura 9.** Componentes principales de un secado por aspersión: (1) sistema de calefacción, (2) sistema de atomización, (3) cámara de secado, (4) sistema de recolección de polvos.

En el proceso de secado por aspersión, el flujo de alimentación es atomizado por la boquilla de aspersión (2) y dirigido hacia el interior de la cámara de secado (3). Posteriormente las gotas entran en contacto de manera paralela en co-corriente con el flujo del aire de secado que ha sido previamente calentado en la cámara de calentamiento (1). De esta forma el agua contenida en las pequeñas gotas de lactosuero concentrado se evaporan produciendo polvos finos, que por diferencia de peso se depositan en el colector de polvos (4) (Anandharamakrishnan y Ishwarya, 2015).

La calidad del producto obtenido se considera excelente debido principalmente a los cortos tiempos de exposición del producto al calor y la protección ejercida por el enfriamiento evaporativo sobre los polvos (Singh y Heldman, 2009). Por otra parte, este proceso permite obtener polvos finos de 10-50  $\mu\text{m}$ , o partículas de un mayor tamaño (hasta de 2 a 3 mm), produciendo un producto deshidratado que puede ser fácilmente almacenado y reconstituido (Gharsallaoui *et al.*, 2007).

Existen variables del proceso de secado por aspersión que afectan la calidad de los polvos resultantes. Estas variables se pueden dividir en dos categorías: las variables relativas a la muestra, entre las que se encuentran los sólidos totales, la cantidad de agua, la viscosidad y la densidad; y las variables relativas a los parámetros de operación del equipo de secado, que incluyen la humedad relativa del aire secante, la presión de asperjado, el diámetro de la boquilla y la velocidad de flujo (Mondragón *et al.*, 2013). Dependiendo de las características del producto a secar así como del producto deseado, se suelen modificar los parámetros del proceso para optimizar la operación del secado y obtener los mejores rendimientos y calidad del producto deshidratado.

El secado por aspersión del suero de leche ha sido ampliamente estudiado en la literatura. Iglesias y Hall (1997) caracterizaron el proceso de secado por aspersión de lactosuero usando diferentes variables de operación y su efecto en la funcionalidad de las proteínas de lactosuero. Estos autores reportaron que la temperatura de salida del aire secante fue el factor limitante principal para no desnaturalizar las proteínas del suero y así conservar las propiedades funcionales de éstas. La temperatura máxima del aire de salida debe estar en el rango de 70 a 80°C para un óptimo secado (Villegas de Gante, 2004).

Joven *et al.* (1993), microencapsularon grasa de leche anhidra en concentrados de proteína y aislado de proteína de lactosuero por secado por aspersión. Los autores caracterizaron los efectos de diferentes tipos y concentraciones de agentes de microencapsulación y concentraciones de grasa sobre el rendimiento y la eficiencia de la microencapsulación. Los autores reportaron rendimientos de encapsulación de más del 90% para todos los sistemas evaluados.

### **2.6.2 Obtención de proteína a partir de granos**

Las proteínas de origen vegetal tienen una amplia gama de aplicaciones en la industria alimentaria. Entre las fuentes proteicas más utilizadas por su balance de sus aminoácidos se encuentran los granos de cereales y de leguminosas. Recientemente también se ha puesto interés en los granos de algunos pseudocereales como el amaranto y la quinoa, ya que se ha reportado que estos productos contienen buena cantidad de proteína de alta calidad. En la actualidad la soya es la fuente de proteína vegetal más utilizada a nivel industrial en la elaboración de alimentos balanceados para aves de postura.

Para el aprovechamiento de las fuentes de proteína de origen vegetal es necesario aplicar una serie de tratamientos que nos permitan disponer de las proteínas y eliminar las sustancias antinutrientes que se encuentran en la mayoría de los granos y semillas (Elizalde *et al.*, 2009). Los tratamientos previos a la incorporación en el alimento balanceado constan de diversas operaciones entre las que se encuentran las siguientes: limpieza; lavado; tostado de las semillas (tratamiento térmico); molienda, con la finalidad de aumentar la superficie de contacto; y desengrasado, donde se retira la mayor parte de los lípidos presentes con ayuda de solventes. A continuación se describen brevemente cada uno de estos procesos.

#### 2.6.2.1 Lavado (*Método húmedo*)

Las semillas de donde se obtienen las proteínas vegetales son lavadas con agua, esto con dos objetivos principales. Primero, retirar mediante lavado los objetos contaminantes y ajenos al producto, tales como tierra y materias orgánicas propias de la etapa de cultivo (hojas, tallos, cáscara, entre otros). Por otro lado, los lavados son un método húmedo para la remoción de sustancias antinutrientes como las saponinas (Quispe *et al.*, 2012; Barrózo-Yáñez *et al.*, 2009), que son consideradas como termoestables, dado que no son destruidas mediante el proceso de tostado (tratamiento térmico).

#### 2.6.2.2 Tratamiento térmico (*tostado*)

Las semillas de donde son obtenidas las proteínas vegetales contienen sustancias antinutrientes. Para destruir estas sustancias se realiza un proceso de tostado, previo a la molienda y al desengrasado (Elizalde *et al.*, 2009). Los antinutrientes son compuestos contenidos en las semillas que afectan el valor nutricional del producto, ya que causan un efecto negativo en la asimilación de nutrientes principalmente de origen vegetal. Los antinutrientes se clasifican en dos grupos, de acuerdo a su resistencia a tratamientos térmicos los cuales son:

##### -Termoestables

Estos compuestos son resistentes a los tratamientos térmicos convencionales. Dentro de este grupo se incluyen: los factores antigénicos, aminoácidos no proteicos tóxicos, saponinas, estrógenos, cianógenos y fitatos.

### -Termolábiles

Estos compuestos sufren degradación cuando son sometidos a calentamiento seco a temperaturas mayores a 120°C (Saini, 1989; Kwok *et al.*, 1993). Entre los compuestos que se incluyen en esta categoría están los siguientes: inhibidores de proteasas (tripsina y quimotripsina), lectinas, goitrogenos y antivitaminas (Elizalde *et al.*, 2009).

Por otro lado, considerando la poca información existente en la literatura sobre el procesamiento del huauzontle, en este trabajo se revisaron las técnicas para la inhibición de antinutrientes en granos de quinoa. Esto se realizó considerando la estrecha relación genética que comparte el huauzontle con la quínoa. Los principales antinutrientes presentes en la harina de quínoa son: saponinas, ácido fítico, taninos e inhibidores de proteasas (Maradini *et al.*, 2017). El tratamiento recomendado y efectivo para inactivar los antinutrientes en quínoa es el descascarado, limpieza, lavados con agua (antinutrientes termoestables) y por último el tostado de las semillas 200 °C por 5 min (antinutrientes termolábiles) (Brady *et al.*, 2007).

#### 2.6.2.2 Molienda

El proceso de molienda de las semillas sirve para reducir su tamaño de partícula a tamaños de entre 2,500 y 630 µm (Safaa *et al.*, 2009). La reducción de tamaño de partícula aumenta la superficie de contacto de las semillas, lo que a su vez facilita la extracción de grasa con disolventes de extracción.

#### 2.6.2.3 Extracción de aceites (desengrasado)

La humedad de la harina se evapora por medio de calentamiento en horno, para obtener valores de humedad de la semilla menores al 8%, favoreciendo así la extracción de grasa. El proceso de desengrasado se realiza por medio de la utilización de disolventes orgánicos, debido a la eficiencia de este tipo de extracción en el rendimiento de aceite y las condiciones fisicoquímicas moderadas para la extracción. En este proceso se extraen las micelas de grasa mediante un arrastre con hexano comercial a partir de la matriz (harina). El disolvente (hexano o éter) se recuperan por destilación al vacío para su posterior reutilización, favoreciendo así la rentabilidad del proceso.

## **2.7 Modelo Simplex de optimización mediante un sistema de programación lineal (ecuaciones lineales)**

En el área de la ingeniería en alimentos constantemente se desarrollan nuevos productos ya sea para el consumo humano o en el caso de este proyecto para consumo animal. Para esto se utilizan herramientas matemáticas para formulación de productos mediante modelos de programación lineal para la optimización del costo de la formulación del producto.

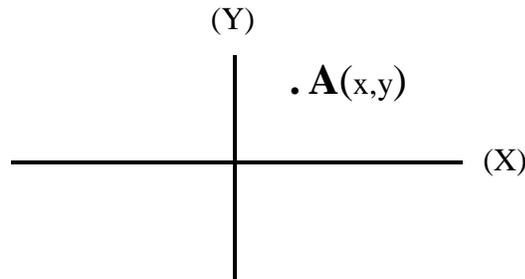
Los alimentos para gallinas ponedoras están constituidos por una mezcla de componentes que proporcionan los macronutrientes necesarios para la etapa de desarrollo y producción de huevo. Para la optimización de la formulación del alimento balanceado se requiere de un modelo matemático lineal para la estimación de las cantidades adecuadas de los diferentes ingredientes que permita satisfacer las necesidades nutricionales de las gallinas ponedoras y a la vez la optimización de estos componentes con el objetivo de reducir los costos de producción del alimento balanceado. En muchos casos es posible encontrar una solución factible que satisfaga los requerimientos nutricionales y al mismo tiempo optimice los costos del producto.

La programación lineal es un recurso matemático que permite optimizar el costo de producción de un producto y al mismo tiempo lograr que el producto cumpla con una serie de especificaciones o restricciones. En el caso de este proyecto, estas restricciones se establecerán con base a la cantidad de proteína bruta, lisina y metionina+cisteína que requieren las gallinas en la etapa de producción de huevo.

El método Simplex es un modelo analítico de solución de sistemas de programación lineal. Para entender la programación lineal y el método Simplex debemos basarnos en las soluciones gráficas para sistemas de ecuaciones lineales de dos variables, las cuales permiten entender de manera clara cómo funcionan y resuelven los sistemas de programación lineal.

A continuación se describen el proceso de la solución de un sistema lineal mediante el método gráfico. Se requiere de un plano cartesiano como el de la Figura 10 donde los dos ejes representan las variables del sistema de ecuaciones  $(x, y)$ , para las que se requieren encontrar la solución; las cuales pueden ser: costos, volúmenes o alguna otra unidad de medición que represente las cantidades de materias primas incorporadas en la formulación final óptima. Dentro del plano cartesiano, “espacio problema”, se encontraran las

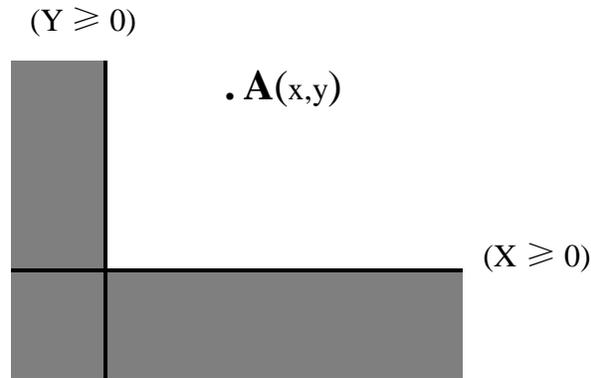
soluciones potenciales del sistema de ecuaciones, si es que éstas existen. Las soluciones potenciales son un punto con un par de valores, uno en la ordenada al origen ( $x$ ) y el otro correspondiente a la abscisa al origen ( $y$ ). Estos valores representan las coordenadas de un punto específico en el espacio problema (plano cartesiano). Así entonces la solución al problema se puede representar por el punto A como lo muestra la Figura 10.



**Figura 10.** Plano bidimensional (espacio problema).

Sin embargo en el espacio problema existen infinidad de soluciones posibles; lo cual no significa que todas estas soluciones sean adecuadas para el sistema. Por ello se requiere el uso de restricciones para delimitar una región en el espacio problema donde podremos encontrar una solución factible. La región del espacio problema que se ajusta a todas las restricciones se denomina “región factible”.

Las restricciones son condiciones lógicas aplicadas a un problema de aplicación. Por ejemplo, en la Figura 10 el espacio problema está constituido por valores positivos y negativos; sin embargo los valores negativos no son factibles para problemas de aplicación donde la solución está basada en cantidades reales como pesos, dimensiones, etc. Por ello, en estos casos, se aplican las restricciones no negativas, donde  $X \geq 0$  y  $Y \geq 0$ . De esta manera las restricciones limitan el espacio problema al cuadrante positivo, tal como lo muestra la Figura 11.

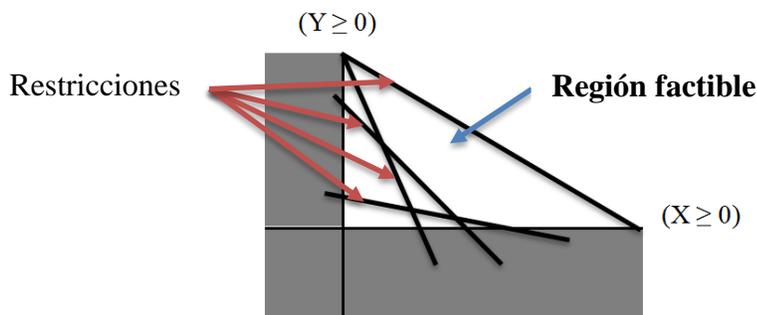


**Figura 11.** Espacio problema con restricciones de no negativos ( $X \geq 0$  y  $Y \geq 0$ ).

Por otro lado en los problemas de optimización de formulaciones es común establecer restricciones propias de la masa combinada  $X + Y \leq 100$ ; donde se establece que la suma de los ingredientes es menor o igual a 100% de producto. Además de esto, a partir del problema particular se debe plantear restricciones específicas para las cuáles se busca una solución. A diferencia de la primeras dos restricciones, las restricciones de frontera específicas no se hallan a lo largo de los ejes, sino a lo largo de una línea recta, cuya ecuación se obtiene a partir de las condiciones (restricciones) del problema real. Por ejemplo, considere que los requerimientos de proteína en un alimento para gallinas de postura, obtenido de dos fuentes proteicas ( $X$ ,  $Y$ ) se puede expresar de acuerdo a la Ecuación 2.4. De manera análoga se pueden plantear restricciones similares para otros ingredientes del problema.

$$0.13X + 0.21Y = 16.5 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Cada una de las restricciones define una línea recta que divide el espacio problema (cuadrante de los positivos) en un medio plano. Como la solución debe cumplir todas las restricciones, ésta debe encontrarse dentro de todos los medios planos; es decir, dentro de la intersección de todos los medios planos. Esta intersección se conoce como “la región factible del problema” como lo muestra la Figura 12. La solución del problema corresponderá a un punto situado dentro de la región factible.



**Figura 12.** Región factible (delimitada por restricciones específicas y generales).

En la Figura 12 se observa que la región factible se encuentra limitada por un polígono formado por una serie de líneas rectas. Estos segmentos forman intersecciones en vértices que se denominan “puntos extremos”. En la mayoría de problemas la solución más económica se encuentra en algún punto extremo.

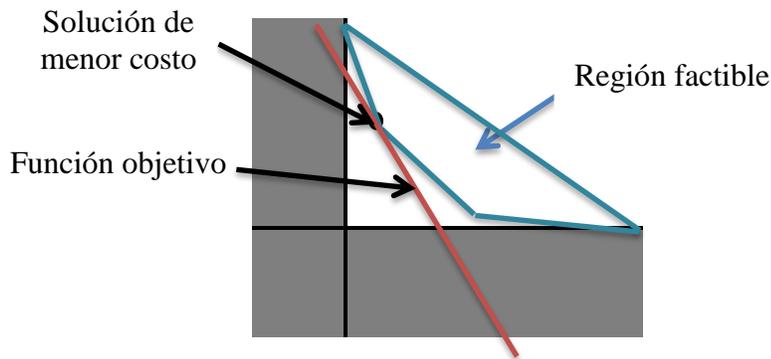
Para fines de este proyecto y de manera general en la optimización de formulaciones comerciales, el factor más importante es el costo de producción del producto; es decir, el costo del alimento balanceado para gallinas ponedoras. Considerando lo anterior, en esta parte del proyecto se pretende obtener la solución que cumpla con las restricciones nutricionales y a la vez al menor costo posible del producto, mediante el planteamiento de una función objetivo basada en el costo unitario de cada materia prima como se expresa en la Ecuación 2.5 a continuación:

$$\text{\$}x X + \text{\$}y Y = Z \quad (\text{Ec. 2.5});$$

donde  $\text{\$}x$  y  $\text{\$}y$  son el costo unitario de las materias primas,  $X$  y  $Y$  son las cantidades de las materias primas utilizados para la elaboración del producto y  $Z$  es el costo total de los ingredientes principales por 100 kg de producto.

Para encontrar la solución del problema, expresada por las cantidades requeridas de materias primas, es preciso encontrar dos o más puntos de la región factible que minimicen el valor de  $Z$  de la función objetivo. Para realizar esto, se comienza por elegir un valor arbitrario para  $Z$  y se traza la línea recta resultante de la función objetivo. En realidad, todas las líneas generadas por la misma función objetivo tendrán la misma pendiente. Por lo tanto para encontrar el punto que representa la solución de menor costo, se debe trazar cualquier

línea que satisfaga la función objetivo y desplazarla sin alterar su pendiente, hasta encontrar la línea de menor costo dentro de la región factible, la cual se encuentra en la intersección de la recta de la función objetivo y el punto dentro de la región factible más cercano al origen, como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13.** Solución de menor costo resultado de la función objetivo, la cual está dentro de la región factible.

Sustituyendo las coordenadas del punto de la solución en la función objetivo obtenemos el costo solución “Z” en la Ecuación 2.2. El método gráfico que se describió anteriormente sirve para explicar el principio del método simplex e ilustrar el método de resolución por programación lineal. Sin embargo es importante mencionar que el método gráfico solo es funcional para problemas de dos variables que pueden ser representados de manera bidimensional.

En el método gráfico descrito anteriormente, la solución óptima del problema siempre se encuentra asociada con un punto extremo de la región factible de soluciones. Este punto es clave para el método Simplex algebraico que permite resolver cualquier problema de programación lineal. La transición de la solución grafica al método Simplex implica utilizar hojas de cálculo para resolver de forma algebraica los puntos esquina y así hallar la solución factible. Esto se logra convirtiendo las restricciones de desigualdad en ecuaciones, para después manipular esas ecuaciones usando algebra lineal y métodos computacionales iterativos. Cada iteración se desplaza a una solución potencialmente mejor que la anterior para la función objetivo. El proceso termina cuando ya no se puede mejorar la solución. El

método Simplex implica cálculos tediosos y voluminosos, lo que hace a la hoja de cálculo del Excel una herramienta esencial para resolver los problemas de programación lineal con más de dos variables. En el proceso de los cálculos del método Simplex es recomendable que las restricciones de programación lineal sean todas ecuaciones con el lado derecho no negativo y que todas las variables sean no negativas.

### 2.7.1 Pasos del método Simplex

El modelo del problema debe constar de ciertos elementos para ser solvente y debe cumplir con las siguientes condiciones:

- El objetivo del problema consistirá en maximizar o minimizar el valor de la función objetivo
- Todas las restricciones deben ser ecuaciones de igualdad
- Todas las variables ( $x_i$ ) deben tener valor positivo o nulo.
- Los términos independientes ( $b_j$ ) de cada ecuación deben ser no negativos

Primero se define la función objetivo, queda expresada como:

$$\$_1x_1 + \$_2x_2 = Z_1 \quad (\text{Ec. 2.10});$$

donde  $\$_1$  y  $\$_2$  son el costo unitario de las materias primas,  $x_1=c_1$  y  $x_2=c_2$  son las cantidades en masa o volumen de materia prima requeridos para elaboración de cierto producto al menor precio posible, y  $Z_1$  es el menor precio posible de elaboración.

Posteriormente se tiene que adaptar los datos del problema al modelo de la forma estándar para poder aplicar el algoritmo Simplex. Para ello se normalizan las restricciones a ecuaciones de igualdad, exceptuando la restricción de no negatividad de las variables ( $x_1, \dots, x_n \geq 0$ ), que es la única restricción que se mantiene como desigualdad. Según el tipo de restricción se aplica un método de normalización como se describe a continuación:

- Restricciones de tipo “ $\leq$ ”

Para normalizar una restricción de este tipo, hay que añadir una nueva variable, llamada de holgura “ $x_s$ ” (con la condición de no negatividad:  $x_s \geq 0$ ). Esta nueva variable aparece con el coeficiente cero en la función objetivo, y sumando en la ecuación correspondiente como se muestra a continuación.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \leq b_1 \quad \rightarrow \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + x_s = b_1 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

- Restricciones de tipo “ $\geq$ ”

En este caso también hay que agregar una nueva variable llamada variable de exceso  $x_s$  (con la condición de no negatividad:  $x_s \geq 0$ ). Esta nueva variable aparece con el coeficiente cero en la función objetivo, y restando en la ecuación correspondiente como se muestra a continuación.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \geq b_1 \quad \rightarrow \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 - x_s = b_1 \quad (\text{Ec.2.7})$$

Al realizar la primera iteración con el método Simplex, las variables básicas no estarán en la base y tomarán valor de cero. Con esto la nueva variable  $x_s$  tomará el valor  $-b_j$  y no cumpliría la condición de no negatividad. Por ello es necesario agregar otra nueva variable  $x_r$ , llamada variable artificial, que también aparece con el coeficiente cero en la función objetivo, y sumando en la ecuación de restricción correspondiente como se muestra a continuación.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \geq b_1 \quad \rightarrow \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 - x_s + y_r = b_1 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

- Restricciones de tipo “=”

En este caso también es necesario agregar variables artificiales  $x_r$ . Como en los casos anteriores, su coeficiente será cero en la función objetivo, y sumando en la ecuación de restricción correspondiente como se muestra a continuación.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1 \quad \rightarrow \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + x_r = b_1 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Una vez adaptadas las restricciones a igualdades se procede a igualar la función objetivo a cero y posteriormente se establece la tabla inicial Simplex. En las columnas aparecerán todas las variables del problema y en las filas los coeficientes de las igualdades obtenidas. En la primera fila aparecen los coeficientes de la función objetivo, seguido por una fila para cada restricción.

Sin embargo, considerando que en el presente trabajo las restricciones son de tipo “ $\geq$ ”, en este caso se aplica una variante del método Simplex, denominado método Simplex de la M-

Grande. En este método se considera que dado que al introducir las variables artificiales de las restricciones de tipo “ $\geq$ ” se alteran las restricciones de un solo lado de la igualdad, para lograr que el sistema sea equivalente al modelo estándar Simplex se debe garantizar que las variables artificiales valgan cero. Para garantizar esto, se agrega a la función objetivo normalizada un coeficiente M (positivo) para cada variable artificial, como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Tabla Simplex de la M-Grande\* para resolver problemas con restricciones de tipo “ $\geq$ ”.

|           | Z | $x_1$ | $x_2$ | $x_s$ | $x_{...n}$ | $y_r$  | $y_{...n}$ | Solución |
|-----------|---|-------|-------|-------|------------|--------|------------|----------|
| F.O.      |   |       |       |       |            | $-M^1$ | $-M^1$     |          |
| $R_1$     |   |       |       |       |            |        |            |          |
| $R_2$     |   |       |       |       |            |        |            |          |
| $R_{...}$ |   |       |       |       |            |        |            |          |
| $R_n$     |   |       |       |       |            |        |            |          |

\*El signo negativo del coeficiente M se produce al igualar la F.O. con cero.

Posteriormente se comienza con la primera iteración. Para ello, se encuentra la variable de decisión que entra en la base. Para escoger dicha variable, nos fijamos en la primera fila, la de los coeficientes de la función objetivo y escogemos la variable con el coeficiente negativo con mayor valor absoluto. Si existen dos o más coeficientes iguales que cumplan la condición anterior, entonces se elige cualquiera de ellos. La columna de la variable que entra en la base se llama columna pivote.

Posteriormente se debe encontrar la variable de holgura que tiene que salir de la base; para ello, se divide cada término de la última columna (solución) por el término correspondiente de la columna pivote, siempre que estos últimos sean mayores que cero. El término de la columna pivote que en la división anterior de lugar al menor cociente positivo, indica la fila de la variable de holgura que sale de la base. Esta fila se llama fila pivote. En la intersección de la fila y columna pivote se tiene el elemento pivote operacional. Una vez identificados estos elementos se procede a las siguientes operaciones:

- Se dividen todos los coeficientes de la fila pivote por el elemento pivote operacional, el cual se vuelve 1.
- A continuación, mediante la reducción Gaussiana, se hacen cero el resto de los términos de la columna pivote.

Con estas operaciones obtenemos los nuevos cocientes de las otras filas y columnas incluyendo los de la función objetivo. Llegando a este punto se tienen los resultados de la primera iteración. Este procedimiento se repite hasta que los coeficientes de la fila de la función objetivo sean positivos, entonces se ha llegado a la solución óptima. La solución óptima está dada por los valores de la columna “solución” que intersectan con los pivotes de cada una de las filas, como se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Tabla de resultados de optimización por el método de optimización Simplex de la M-Grande resuelta mediante iteraciones utilizando la reducción de Gauss Jordan.

|           | Z | $x_1$ | $x_2$ | $x_s$ | $x_{...n}$ | $y_r$ | $y_{...n}$ | Solución |
|-----------|---|-------|-------|-------|------------|-------|------------|----------|
| F.O.      | 1 |       |       |       |            |       |            | $Z_1$    |
| $R_1$     |   |       | 1     |       |            |       |            | $c_1$    |
| $R_2$     |   |       |       |       |            |       |            |          |
| $R_{...}$ |   | 1     |       |       |            |       |            | $c_2$    |
| $R_n$     |   |       |       |       |            |       |            |          |

### **3. Marco conceptual de la tesis**

#### **3.1 Originalidad**

La implementación de proteína vegetal como fuente de nitrógeno en alimentos para animales no rumiantes, se ha practicado a largo de la historia desde el neolítico hasta nuestros días, utilizando soya, maíz, trigo, arroz y frijol, como fuentes principales de origen vegetal. Sin embargo existen otros productos vegetales que pueden usarse como fuentes proteicas alternativas, como es el caso del huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*). El huauzontle es una planta nativa de México cuyas semillas contienen proteínas que potencialmente tienen una alta calidad proteica de acuerdo a su composición de aminoácidos esenciales.

A partir de la investigación bibliográfica realizada se puede apreciar la poca información científica disponible relacionada con el valor proteico del huauzontle, y menos aún sobre la aplicación de esta planta como ingrediente para la elaboración de alimentos balanceados. En la actualidad el huauzontle es aprovechado solo por un sector reducido de la población mexicana principalmente en la zona centro del país.

Por otro lado aunque la información relacionada al lactosuero está bien documentada en la literatura por su alto contenido nutricional, no se encontraron reportes sobre su aplicación como fuente proteica para la formulación de alimentos balanceados para gallinas de postura. Por otro lado, se ha reportado la utilización de lactosuero como suplemento prebiótico y su implementación doméstica como elemento de engorda para algunos animales de corral. Por lo anterior, en este trabajo se propone de manera original la utilización de semillas de huauzontle y lactosuero como fuentes de proteína para la elaboración de un alimento balanceado para gallinas de postura.

### **3.2 Justificación**

Los alimentos balanceados para gallinas de postura requieren el suministro de carbohidratos como aporte energético, así como de una fuente proteica. En el caso particular de este tipo de gallinas la proteína suministrada debe ser de alta calidad debido que se requiere de un perfil de aminoácidos esenciales específico para la manutención y la producción de huevo. Debido a esto, la soya es la fuente proteica más usada en la industria avícola. Sin embargo, el 95% de la soya en México es importada de Estados Unidos lo que a su vez incrementa el costo de producción de los alimentos balanceados para gallinas de postura. Por ello existe la necesidad de buscar fuentes proteicas alternativas, tales como la semilla de huauzontle y el lactosuero, que por un lado incentiven la reactivación y explotación del cultivo de una planta endémica de México así como la utilización de desechos agroindustriales. En general se pretende que a mediano plazo el uso de estas fuentes alternativas permitan disminuir el costo de producción de alimentos balanceados de una manera sustentable mediante la industrialización de este proceso.

El lactosuero es un residuo agroindustrial producto de la industria quesera que tiene un contenido importante de proteína. Sin embargo, a pesar de esto, los productores queseros generalmente desechan el suero de leche al drenaje municipal o a los suelos y cuerpos acuíferos, convirtiendo a este residuo en un contaminante ambiental. Las proteínas del lactosuero han sido bien estudiadas y caracterizadas en la literatura científica; sin embargo, su utilización para la alimentación de animales de corral se realiza muy poco y de manera rudimentaria en nuestro país.

La principal aportación del presente proyecto consiste en la elaboración de un alimento balanceado para gallinas de postura aprovechando el potencial proteico de alta calidad del suero de leche y de las semillas de huauzontle. En principio, se postula que estas fuentes proteicas puedan satisfacer los requerimientos de aminoácidos esenciales de las gallinas de postura comerciales de la línea Hy-line. Adicionalmente, mediante la incorporación a la formulación de maíz amarillo como fuente de carbohidratos, será posible satisfacer la demanda energética necesaria para las gallinas.

### **3.3 Objetivos**

#### **3.3.1 Objetivo general**

Desarrollar y optimizar la formulación de un alimento balanceado para gallinas de postura, implementando fuentes proteicas alternativas de semillas de huauzontle y lactosuero que permitan la sustitución de la soya, y que cubra adecuadamente las necesidades nutrimentales de la gallina Hy-line w36.

#### **3.3.2 Objetivos específicos**

1. Realizar el análisis proximal de las materias primas utilizadas para la elaboración del alimento balanceado para gallinas de postura Hy-line w36: huauzontle, lactosuero y maíz.
2. Determinar el perfil de aminoácidos de las semillas de huauzontle.
3. Preparar y acondicionar los ingredientes en polvo de semillas de huauzontle, maíz y lactosuero, listos para la formulación del alimento balanceado.
4. Formular el alimento balanceado con base en la optimización del costo del producto considerando el contenido de proteína total y el perfil de aminoácidos de las diferentes materias primas.
5. Evaluar la calidad de la formulación con respecto a otros alimentos balanceados comerciales.

### **3.4 Metas**

#### **Para el objetivo 1**

1.1 Determinación del análisis proximal de las muestras de huauzontle, lactosuero y maíz, incluyendo determinaciones de humedad, cenizas totales, grasa cruda, fibra total, azúcares totales y proteína cruda usando métodos estándar.

#### **Para el objetivo 2**

2.1 Determinación del perfil de aminoácidos de las semillas de huauzontle por HPLC.

#### **Para el objetivo 3**

3.1 Obtención de polvos del huauzontle y maíz, mediante los procesos de limpieza, tostado y molido de los granos.

3.2 Obtención de lactosuero concentrado, utilizando procesos de membranas, micro y ultrafiltración.

3.3 Obtención de polvos del lactosuero utilizando secado por aspersión.

#### **Para el objetivo 4**

4.1 Planteamiento del problema de optimización y de sus restricciones con base en las necesidades de proteína, lisina y cisteína-metionina de las gallinas Hy-line w36.

4.2 Planteamiento de las ecuaciones del sistema de programación lineal, con base en función objetivo y las restricciones de proteínas, lisina y metionina+cisteína.

4.3 Optimización de la función objetivo usando el método Simplex.

4.4 Formulación de alimentos balanceados con base al perfil de aminoácidos y análisis proximales de los componentes individuales.

4.5 Análisis de los resultados.

## **Para el objetivo 5**

5.1 Realización de análisis proximales del alimento formulado.

5.2 Comparación de la calidad nutricional (proteínas) entre el producto final y los productos comerciales.

## 4. Metodología

El origen de las materias primas utilizadas en este proyecto se enlista a continuación. El huauzontle se adquirió del productor Joel Aguilar del municipio de San Salvador Huixcolotla, Puebla. El maíz amarillo de la marca Alpesur fue comprado de la distribuidora agrícola Carlos Innes en la ciudad de Oaxaca, y el lactosuero fue proporcionado por la Procesadora de Lácteos “LA NONA” S.P.R. de R.L., ubicada en el municipio de Los Reyes Etna, Oaxaca.

### 4.1 Caracterización del huauzontle y del maíz amarillo

Para la realización de los análisis fisicoquímicos, las semillas de huauzontle y maíz amarillo fueron previamente molidas en un molino de tipo ciclónico, para obtener harinas con tamaño de partícula de 1 mm, utilizadas posteriormente para análisis fisicoquímicos y para procesamiento posterior.

#### 4.1.1 Análisis proximal

Se tomaron muestras de las harinas de huauzontle y de maíz amarillo, de tal manera que éstas fueran representativas de cada lote. En la Tabla 11 se muestran los análisis proximales que se realizaron a las harinas de huauzontle y de maíz amarillo. En los siguientes párrafos se describen brevemente los métodos analíticos empleados para la realización de los análisis proximales. Los resultados de los análisis proximales de las materias primas fueron expresados en base seca.

**Tabla 11.** Análisis proximal realizado a las semillas de huauzontle y de maíz amarillo.

| Determinaciones | Referencia  |
|-----------------|---|
| Humedad         | Método gravimétrico de la AOAC 925.5                        |
| Cenizas         | Método gravimétrico de la AOAC 923.03                       |
| Grasa           | Método de Soxhlet de la NMX-F-089-S-1978                    |
| Proteína        | NMX-F-068-S-1980 (modificado).<br>Determinación de proteína |
| Fibra cruda     | NMX-F-090-S-1978. Determinación de fibra cruda              |

### **Determinación de humedad**

La humedad fue determinada utilizando el método 925.5 de la AOAC. Se colocó 1 g de harina (huauzontle o maíz) en un crisol seco previamente pesado, y se sometió a una temperatura de 105 °C en un horno por 24 h. Posteriormente el crisol fue atemperado en un desecador por 20 min para finalmente ser pesado. La humedad fue calculada usando la siguiente ecuación 4.1:

$$\% \text{ humedad} = \frac{W_h - W_s}{W_h - W_v} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.1});$$

donde  $W_h$  es el peso del crisol con la muestra húmeda,  $W_s$  es el peso del crisol con la muestra seca y  $W_v$  es el peso del crisol vacío.

### **Determinación de cenizas totales**

Las cenizas totales fueron determinadas por el método gravimétrico de la AOAC 923.03. Un crisol se llevó a peso constante en una estufa a 125 °C por 5 h. Posteriormente se dejó enfriar hasta temperatura ambiente en un desecador. La masa del crisol fue medida en una balanza analítica.

Posteriormente, se colocó 2 g de harina previamente secada en el crisol. Se pesó el crisol con la muestra, seguido de lo cual la muestra fue carbonizada en una parrilla de calentamiento hasta que la muestra dejó de emitir humos (aproximadamente 1 h). La muestra carbonizada se colocó en una mufla a 550 °C por 24 h. Finalmente el crisol se puso en una estufa a 105 °C por 20 min para su posterior pesado, una vez enfriado. El contenido de cenizas totales fue calculado con la siguiente ecuación 4.2:

$$\% \text{ de cenizas totales} = \frac{W_C - W_B}{W_B - W_A} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.2});$$

donde  $W_A$  es el peso del crisol vacío,  $W_B$  es el peso del crisol con la muestra seca y  $W_C$  es el peso del crisol con la muestra calcinada.

### **Contenido de grasa cruda**

El contenido de grasa cruda fue determinado de acuerdo al método Soxhlet descrito en la NMX-F-089-S 1978. Un matraz de destilación fue colocado dentro de una estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante. Se cargó 2 g de harina en un cartucho de celulosa y éste fue

colocado en el extractor Soxhlet. Se utilizó hexano para realizar la extracción por aproximadamente 5 h. El disolvente fue removido de la muestra en un rotavapor (69 °C). El matraz con la grasa extraída se colocó en una estufa a 105 °C por 20 min y posteriormente fue pesado. El porcentaje de grasa cruda fue determinada por la siguiente ecuación 4.3:

$$\% \text{ de grasa cruda} = \frac{W_g - W_v}{W_m} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.3});$$

donde  $W_g$  es el peso del matraz con la grasa,  $W_v$  es el peso del matraz vacío y  $W_m$  es el peso de la muestra.

### **Contenido de proteína cruda**

El contenido de proteína cruda se determinó usando el método de Kjeldahl modificado con ácido bórico. Se colocó 0.15 g de harina deshidratada en papel libre de nitrógeno y éste se introdujo en un tubo de digestión. Adicionalmente se analizó un tubo de digestión con papel sin muestra como blanco. Se añadió 40 mg de sulfato de cobre pentahidratado, 1.3 g de sulfato de potasio y 2.5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado en cada tubo de digestión.

Los tubos de digestión fueron colocados en la unidad de digestión, introduciendo las boquillas en el colector de humos. Se aumentó la temperatura para la digestión progresivamente hasta que las paredes del matraz estuvieron limpias y la disolución obtuvo un color azul traslúcido; seguido de lo cual, se retiró la fuente de calor y el matraz se dejó enfriar.

Posteriormente se adicionó 7 mL de agua destilada a cada tubo, y los tubos se agitaron para posteriormente colocar la muestra en la unidad de destilación. Después de esto se adicionó a la muestra 10 mL de una disolución de hidróxido de sodio (NaOH) al 50%. La solución se destiló en la unidad de destilación Kjeldahl, burbujeando el destilado en 5 mL de ácido bórico al 4% adicionado con 2 gotas de indicador Rojo de Metilo hasta que se alcanzó aproximadamente un volumen de 50 mL. Finalmente las soluciones fueron valoradas con HCl 0.10 N, hasta que se obtuvo un cambio de color de rojo a morado con el mismo tono de la muestra blanco. La proteína cruda de la muestra fue calculada utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ de nitrógeno} = 1.4 \times \frac{N(B-S)}{W_m} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.4});$$

$$\% \text{ de proteína} = 6.25 \times (\% \text{ de nitrógeno}) \quad (\text{Ec. 4.5});$$

donde B es el volumen gastado de HCl en la valoración del blanco, S es el volumen gastado en la valoración de la muestra, N es la normalidad de la especie titulante y  $W_m$  es el peso de la muestra.

El factor de conversión 6.25 fue escogido asumiendo que las proteínas de las semillas oleaginosas tienen un 16% de nitrógeno (Gonzales *et al.*, 2011).

### **Contenido de fibra cruda**

La determinación del contenido de fibra cruda se realizó mediante el método descrito en la norma mexicana NMX-F-090-S-1978. Se adicionó 2 g de muestra a un vaso de precipitado de 600 ml, después de lo cual se agregó 1 g de asbesto preparado y 200 ml de ácido sulfúrico al 1.25% hirviendo. La mezcla se dejó hervir por 30 min. Posteriormente se quitó el vaso, y la mezcla se filtró a través de papel filtro libre de cenizas; después de lo cuál el filtrado se lavó con agua pasada por ósmosis y después se volvió a filtrar. Se repitió el lavado y filtrado tantas veces como fue necesario, hasta que las aguas de lavado tuvieron un pH igual al del agua pasada por ósmosis. Después de esto el residuo sólido se transfirió a un vaso usando 200 ml de NaOH al 1.25% hirviendo, seguido de lo cual se calentó a ebullición exactamente por 30 min. La solución se filtró en un embudo tipo Buchner con papel filtro libre de cenizas. A continuación se aplicaron lavados con agua pasada por ósmosis hasta que las aguas de lavado tuvieran un pH igual al del agua. Después de esto, se transfirió el papel filtro con el residuo sólido a un crisol a peso constante y se sometió a secado a 130 °C durante 2 h, seguido de lo cual se dejó enfriar y se determinó su masa. Posteriormente, la muestra se calcinó a 600 °C por 30 min, y finalmente ésta se enfrió y se determinó su masa con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ de fibra cruda} = \frac{(P_s - P_p) - (P_c - P_{cp})}{M} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.6});$$

donde  $P_s$  es el peso del residuo seco a 130 °C,  $P_p$  es el peso de papel filtro,  $P_{cp}$  es el peso de las cenizas del papel, M es el peso de la muestra y  $P_c$  el peso de las cenizas.

#### **4.1.1 Determinación del perfil de aminoácidos de las semillas de huauzontle**

Se pesaron de 10–20 muestras secas y se colocaron en viales Eppendorf de 2 ml. Se añadió 300 µl de ácido  $\alpha$ -aminobutírico 0.1 mM (utilizado como patrón interno) en HCl 0.01 M y la muestra fue homogeneizada durante 5 min con un equipo TissueLyzer LT (Qiagen, Alemania) a 50 Hz. La muestra fue centrifugada a 25,000 rpm durante 20 min a 4 °C. Las concentraciones de aminoácidos se determinaron en 10 µl del sobrenadante siguiendo las instrucciones del proveedor del equipo Waters AccQ modificado para UPLC (manual No. WAT052874. Waters, EUA.). Se realizó tanto la derivatización de la muestra como la de los estándares y se inyectó 0.5 µl de muestra derivatizada en una columna ACQUITY UPLC BEH C18 (130 Å, 1.7 µm, 2.1 mm × 50 mm) en un UPLC Acquity Clase H (Waters, EUA.). Para la identificación y cuantificación, se utilizó una mezcla de aminoácidos estándar Waters Amino Acid Hydrolyzate Standard (denominada H). Esta mezcla de 18 aminoácidos contiene una concentración de 2.5 mM de cada uno de los aminoácidos hidrolizados, con excepción de la cisteína que contiene 1.25 mM. Se preparó un estándar de calibración diluyendo 40 µl de H con 960 µl de ácido  $\alpha$ -aminobutírico 0.1 mM en HCl 0.01 M. Posteriormente, 10 µl del estándar de calibración fue derivatizado. Para la separación se utilizaron los mismos eluyentes con un gradiente de velocidades de flujo ajustado. Los eluyentes fueron eluyente A y B (AccQTag y acetonitrilo de grado HPLC, respectivamente) y agua MilliQ 18 M $\Omega$ . min.

#### **4.2 Caracterización del lactosuero**

##### **Determinaciones fisicoquímicas del lactosuero**

El análisis fisicoquímico del suero lácteo se realizó mediante los lineamientos y especificaciones del proyecto de norma PROY-NMX-F-721-COFOCALEC (2012). En este documento se incluyen las determinaciones para el suero lácteo que se muestran en la Tabla 12. Para la realización de los análisis primeramente se tomaron muestras de lactosuero representativas del lote recibido. En los siguientes párrafos se describen brevemente las determinaciones realizadas.

**Tabla 12.** Análisis fisicoquímicos para la caracterización del lactosuero.

| Determinaciones | Referencia                          |
|-----------------|-------------------------------------|
| Proteínas       | NOM-155-SCFI-2003                   |
| pH              | NMX-F-317-S-1978                    |
| Grasa           | NOM-155-SCFI-2003/NOM-086-SSA1-1994 |
| Lactosa         | NOM-155-SCFI-2003                   |
| Cenizas         | NMX-F-607-NORMEX-2002               |
| Humedad         | NOM-184-SSA1-2002                   |
| Densidad        | 962.37 de la AOAC, 1995             |

### **Determinación de proteína total**

La determinación de proteína total se realizó conforme a la norma NOM-155-SCFI-2003 por el método micro Kjeldahl, el cual se describió en la sección anterior en el apartado 4.1.1. El procedimiento tiene una variación en relación al método para muestras sólidas, que consistió en la toma de 1 mL de la muestra líquida, y para llevarla posteriormente al matraz de digestión. Para el resto de la determinación se siguió el mismo procedimiento descrito anteriormente. En este caso, al tratarse de suero de leche, se utilizó un valor de 6.38, que es el factor de conversión de nitrógeno total a proteína para el cálculo de proteína para productos lácteos usado en la literatura (Nielsen, 2009). Finalmente, para el cálculo de la proteína en unidades de g/L se aplicó la siguiente ecuación:

$$\text{Proteína } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right) = \% \text{ de proteína} \times 10 \times \text{densidad} \quad (\text{Ec. 4.7}).$$

### **Determinación de proteína para las fracciones en polvo de la microfiltración y ultrafiltración**

La metodología que se empleó es una modificación a la reportada en la NOM-155-SCFI-2003 (método micro Kjeldahl). Las variantes se describen a continuación: La cantidad de muestra utilizada fue de 0.1 g. Como reactivos catalizadores se empleó 40 mg de sulfato de cobre pentahidratado y 1.3 g de sulfato de potasio. La cantidad de ácido sulfúrico utilizado

fue de 2.5 mL. Finalmente, para la destilación de la muestra se utilizó 7 mL de agua, 5 mL de ácido bórico y 10 mL de NaOH, y el destilado fue valorado con HCl 0.1 N.

### **Determinación de pH**

Se tomó una porción de muestra (líquida) homogénea y se ajustó su temperatura a  $20 \pm 0.5$  °C. Posteriormente, con ayuda de un medidor de pH, previamente calibrado, se realizó la lectura del pH. Para la medición, el electrodo se sumergió dentro de la muestra hasta la altura indicada por el proveedor. Se tomó la lectura directamente del indicador del equipo.

### **Determinación de densidad**

Para realizar la determinación de densidad se empleó el método del picnómetro (962.37 de la AOAC, 1995). La muestra se homogenizó y se ajustó a una temperatura de 20 °C. Posteriormente, se midió 100 mL de muestra para llenar el picnómetro que previamente fue llevado a peso constante. Una vez alcanzado el volumen requerido, el picnómetro se tapó, limpió y pesó. El valor de la densidad se obtuvo mediante la aplicación de la siguiente ecuación.

$$\rho \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{P_m - P_s}{V} \quad (\text{Ec. 4.8});$$

donde  $P_m$  es el peso de picnómetro con muestra,  $P_s$  es el peso del picnómetro sin muestra y  $V$  es el volumen utilizado.

### **Determinación de grasa**

Se realizó la determinación de grasa siguiendo los lineamientos de la Norma Oficial Mexicana NOM-155-SCFI-2003/NOM-086-SSA1-1994. Se mezclaron en estricto orden 10 mL de ácido sulfúrico al 91% (para análisis de leche), 11 mL de muestra y 1 mL de alcohol amílico en un butirómetro de Gerber. Posteriormente se agitó el butirómetro hasta la obtención de una mezcla homogénea. La mezcla se centrifugó por 5 min a 1000-1200 rpm, seguido de lo cual, el butirómetro se colocó en un baño térmico a 65 °C por 5-10 min. Finalmente se tomó la lectura indicada por la escala del butirómetro.

### **Determinación de azúcares totales expresados como equivalentes de lactosa**

Para realizar la determinación de carbohidratos totales, se siguió el método del ácido fenol-sulfúrico, para lo cual 1 mL de muestra se diluyó en una proporción 1:250 con agua pasada por ósmosis inversa. Posteriormente, se colocó 150 µL de la dilución en un tubo de ensaye con la subsecuente adición de 500 µL de fenol en agua al 4% (p/v). Después de esto, se añadió rápidamente 2.5 mL de ácido sulfúrico concentrado sobre la superficie del líquido, seguido de lo cual, el tubo se dejó en reposo por 10 min. En seguida, la solución se agitó y se dejó en reposo en un baño térmico de 25 a 30 °C durante 20 min, después de lo cual se midió la absorbancia de la muestra a 490 nm en un espectrofotómetro UV-vis (Modelo GENESYS 50, marca Thermoscientific). Por otro lado, se preparó una curva de calibración empleando un estándar de lactosa a diferentes concentraciones. La concentración de carbohidratos totales en las muestras (g/L eq. de lactosa) se calculó con base a la ecuación obtenida de la curva de calibración (Anexo 2).

### **Determinación de cenizas**

Se colocó 2 mL de muestra en un crisol a peso constante, seguido de lo cual se carbonizó la muestra en una parrilla durante 1 h. Posteriormente, el crisol con la muestra carbonizada se colocó en la mufla a 550 °C durante 5-6 h, hasta su calcinación completa (cenizas de color blanco). Al finalizar el tiempo de calcinación la muestra se dejó enfriar en un desecador. El contenido de cenizas se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ cenizas totales} = \frac{W_C - W_A}{W_B} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.9});$$

donde:  $W_A$  es el peso del crisol vacío,  $W_B$  el peso de la muestra y  $W_C$  el peso del crisol con cenizas.

### **Determinación de humedad**

De acuerdo con la NOM-184-SSA1-2002, se pesó de 1 a 3 g de muestra. La muestra se colocó en una cápsula previamente secada a peso constante. Las muestras se secaron en la estufa a 100-102 °C por 5 h consecutivas. Posteriormente las cápsulas se colocaron en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente, seguida de lo cual la muestra se pesó. El porcentaje de humedad se obtuvo utilizando la siguiente ecuación.

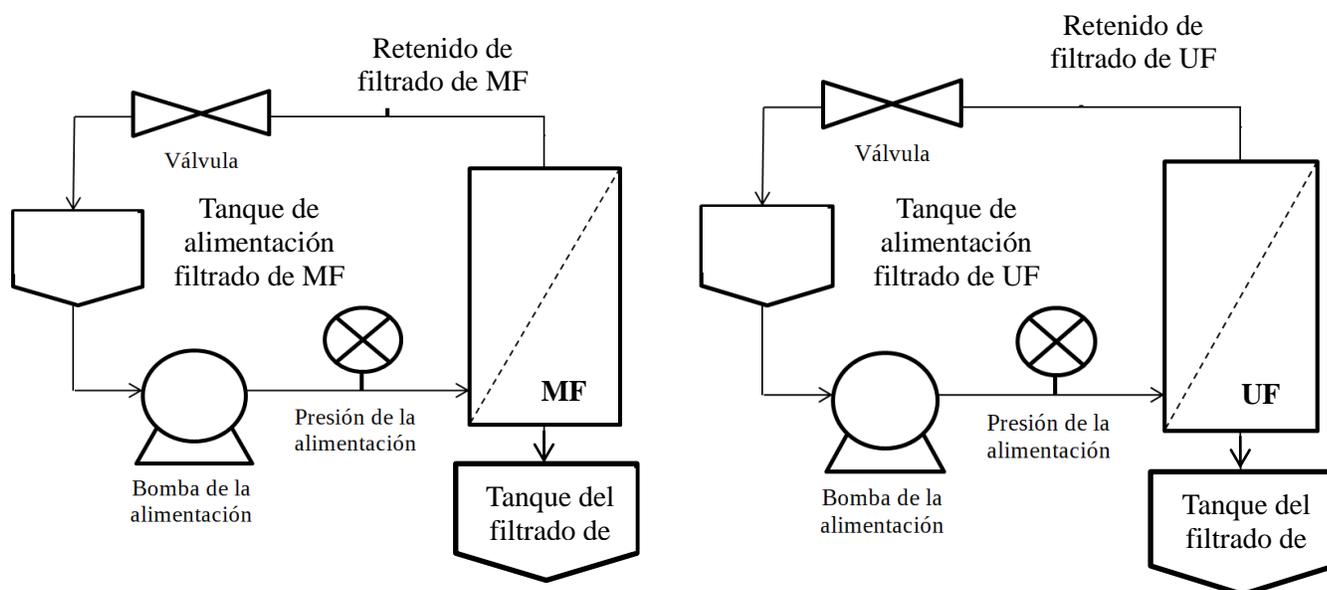
$$\% \text{ de humedad} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100 \quad (\text{Ec. 4.10});$$

donde  $W_0$  es la peso de la cápsula,  $W_1$  la peso de la cápsula con la muestra antes de secar y  $W_2$  la peso de la cápsula con la muestra seca.

## **4.3 Elaboración del alimento balanceado**

### **4.3.1 Concentración de proteína del suero**

Con la finalidad de concentrar la fracción proteica del suero de leche, éste se sometió a un proceso de desengrasado en una descremadora centrífuga, con el objetivo de evitar el taponamiento en la membrana. Luego de esto, el suero lácteo se filtró con flujo tangencial de dos etapas, microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF), como se muestra en la Figura 14. En la primera etapa de concentración de proteína el lactosuero se bombeó por medio de una bomba peristáltica al módulo de la membrana en el que se había instalado previamente la membrana de microfiltración. A la salida del módulo se obtuvieron dos fracciones: por un lado, el retenido, rico en caseína y grasa; y por otro lado, el permeado rico en proteínas del suero, lactosa y sales. En la segunda etapa se empleó un módulo de ultrafiltración. En este caso el permeado de la etapa de microfiltración se alimentó en el módulo de membrana de UF. A la salida de esta etapa se obtuvieron dos fracciones: el retenido, el cual contiene principalmente proteínas del lactosuero; y el permeado, constituido por lactosa y sales minerales principalmente.



**Figura 14.** Proceso de filtración por membrana de micro (MF) y ultrafiltración (UF) en modo de flujo tangencial.

#### 4.3.1.1 Microfiltración

Esta etapa se inició con la limpieza del equipo de filtración que consistió en lavado del equipo y piezas con detergente y cloro. Una vez limpio y seco, se colocó en el módulo de membrana del equipo Pellicon 2 mini (Milipore, EUA) el cartucho de membrana de microfiltración Durapore P2HVMPV01 Pellicon 2 mini (Milipore, EUA) de  $0.45 \mu\text{m}$  con  $0.1 \text{ m}^2$  de área de filtración. Una vez armado el equipo de filtración, se inició el proceso, haciendo recircular 1 L de agua pasada por ósmosis. Una vez pasada el agua por la membrana, se comenzó el bombeo del lactosuero, con un volumen inicial de alimentación conocido, bajo las siguientes condiciones de operación: 2 bar de presión y flujo de 400 mL/min a la entrada de la alimentación. El proceso de filtración se detuvo cuando se alcanzó un factor de concentración (FCV) de 3.5 en la fracción del retenido.

La fracción del permeado fue colectada en un recipiente graduado para monitorear el factor de concentración y el rendimiento. Las fracciones obtenidas fueron debidamente etiquetadas y refrigeradas a  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta el momento de su utilización o análisis. Posteriormente se analizó la proteína cruda y los sólidos de las diferentes fracciones obtenidas en el proceso.

#### *4.3.1.2 Ultrafiltración*

En esta etapa se utilizó una membrana Ultracel P2C010C01 Pellicon 2 Mini (Milipore, EUA) de 10 kDa y con 0.1 m<sup>2</sup> de área de filtración. En esta etapa la fracción del permeado obtenida en la etapa de microfiltración se usó como alimentación de la membrana de UF. Las condiciones de operación relevantes fueron: 2 bar de presión y flujo de 400 a 500 mL/min a la entrada de la alimentación. El proceso de filtración se detuvo al alcanzar un FCV (factor de concentración) de 3.5 en la fracción del retenido. Las fracciones obtenidas fueron debidamente etiquetadas y refrigeradas a 4 °C hasta el momento de su utilización o análisis. Posteriormente se analizó la proteína cruda y los sólidos de las diferentes fracciones obtenidas en el proceso.

#### **4.3.2 Secado por aspersión del suero lácteo**

En la sección anterior se reportó el procedimiento de filtración por membranas, para obtener dos fracciones de concentrados proteicos: los retenidos de la microfiltración y de la ultrafiltración. Las fracciones proteicas fueron sometidas subsecuentemente al proceso de secado por aspersión para obtener polvos de suero lácteo ricos en proteína. Para este efecto, se utilizó un secador por aspersión modelo SP-1500 de la marca NANBEI (China) con una capacidad de 1500 mL/h (Figura 15). Se procesaron dos lotes de alimentación, uno correspondiente al retenido a la etapa de microfiltración y el otro al retenido de la etapa de ultrafiltración.

Las condiciones de operación fueron las siguientes: velocidad de flujo de la alimentación, 10 mL/min; temperatura de aire secante, 150 °C; y temperatura de salida del aire secante, 80 °C. Este último parámetro es de particular importancia ya que si la temperatura en esta etapa se excede por arriba de 80 °C podría producir la desnaturalización de las proteínas del suero lácteo y la aparición de una costra de color marrón ocasionada por el daño térmico a los polvos de lactosuero (Anandharamakrishnan y Ishwarya, 2015). Una vez agotada la alimentación del proceso (concentrados proteicos) se detuvo la operación de secado, y los polvos obtenidos fueron almacenados en ausencia de luz y humedad hasta el momento de ser utilizados o analizados. Posteriormente se determinó la humedad y la proteína bruta de los polvos obtenidos.



**Figura 15.** Componentes principales de un secado por aspersión: (1) sistema de calefacción, (2) sistema de atomización, (3) cámara de secado, (4) sistema de recolección de polvos.

#### **4.3.3 Pesado y limpieza del huauzontle y maíz amarillo**

El huauzontle y maíz amarillo fueron sometidos a los siguientes sistemas de limpieza: limpieza con zarandas y limpieza con ventiladores. La limpieza con zarandas consistió en hacer pasar los granos de huauzontle y maíz por un juego de tamices para retirar partículas ajenas por diferencia de tamaño. En el caso de la limpieza por ventiladores, los granos se pasaron en caída libre por una corriente de aire con la finalidad de separar partículas ajenas por diferencia de peso (Caro-Greiffenstein, 1998). Posteriormente las materias primas fueron pesadas en las cantidades establecidas según la formulación obtenida en el proceso de optimización.

#### **4.3.4 Lavado del huauzontle y el maíz amarillo**

Los granos de huauzontle y maíz amarillo fueron sometidos a un método húmedo de arrastre para la remoción de sustancias antinutrientes (Quispe *et al.*, 2012; Barrózo-Yáñez *et al.*, 2009). Se realizaron una serie de tres lavados con agua, retirando objetos contaminantes ajenos, tales como tierra y materia orgánicas propias de la etapa de cultivo (hojas, tallos, cáscaras, entre otros). Posteriormente, el agua se filtró.

#### **4.3.5 Tostado del huauzontle y el maíz amarillo**

El huauzontle fue sometido al tratamiento recomendado y efectivo para inactivar los antinutrientes termolábiles en granos. El cual consto de un tostado en estufa de las granos a 200°C por 5 min (Brady *et al.*, 2007).

#### **4.3.6 Molienda de huauzontle y maíz amarillo**

Una vez pesadas las cantidades correctas de huauzontle y maíz amarillo. Posteriormente los granos tostados fueron molidos en un molino de tipo ciclónico, con el fin de obtener harinas ideales para la elaboración de un alimento balanceado tipo puré. Este tipo de alimento presenta beneficios económicos al productor al disminuir la ingesta diaria del alimento por gallina (Green, 1991). Se tomaron muestras de las harinas para realizar su caracterización proximal; el resto del producto fue almacenado en refrigeración.

#### **4.4 Análisis estadístico**

Todas las determinaciones y análisis realizados a los productos terminados y las materias primas antes y durante su procesamiento fueron realizados por triplicado con el fin de comprobar su reproducibilidad mediante un análisis de varianza y se reporta como el valor promedio  $\pm$  la desviación estándar.

#### **4.5 Formulación del alimento balanceado**

La formulación del alimento balanceado fue basada en el cumplimiento de los requerimientos energéticos y proteicos de las gallinas de postura Hy-Line w36 en la etapa de producción de huevo, que comprende de la semana 18 a 90 de vida, los cuales estipulan un promedio de 2890 kcal/kg de energía metabolizable y 16.5% de proteína bruta en la etapa de producción de huevos (Hy-Line International, 2013). Para satisfacer la demanda energética y proteica, se elaboró una formulación considerando al lactosuero y al huauzontle como fuente principal de proteína de alta calidad, y al maíz amarillo como fuente principal de carbohidratos. Las cantidades de cada ingrediente se estimaron mediante el uso de programación lineal utilizando el método Simplex de optimización mediante el uso de algoritmos algebraicos e iterativos. La formulación de la función objetivo y las restricciones del problema de optimización se describen a continuación.

En primer lugar se definieron las variables de cantidad de material de cada materia prima como: huauzontle, H; lactosuero, L; y maíz amarillo, M. Como base de cálculo, se determinó que la suma de las cantidades de las materias primas es de 100 kg de alimento balanceado (Ecuación 4.11).

$$H + L + M = 100 \quad (\text{Ec. 4.11});$$

Adicionalmente es necesario formular la función objetivo que relaciona el precio unitario y la cantidad de cada materia prima con el costo del producto (Ecuación 4.12). De acuerdo a esto, con base a la elaboración de la formulación del alimento balanceado más rentable económicamente, se puede proponer la siguiente función objetivo en la que se minimiza el costo de producción para obtener la formulación del alimento balanceado (Ecuación 4.12).

$$\$_h H + \$_l L + \$_m M = Z \quad (\text{Ec. 4.12});$$

donde  $\$_h$  es el costo por kilogramo de huauzontle,  $\$_l$  el costo por kilogramo de lactosuero,  $\$_m$  el costo por kilogramo de maíz amarillo y Z el costo total de elaboración. A continuación se describe las consideraciones realizadas para determinar los costos por kilogramo de las materias primas en el presente proyecto.

En el caso de la semilla de huauzontle, debido a la poca información disponible acerca de la comercialización de este producto, el costo unitario se determinó mediante una estimación promedio entre el costo de la quinoa y la soya. Por un lado se consideró el precio por kg de la semilla de quinoa, considerando las similitudes genéticas y de desarrollo agroindustrial entre los cultivos de huauzontle y de quinoa. Por otro lado, se tomaron en cuenta los precios de la soya procesada en presentación de harina, considerando el elevado desarrollo agroindustrial de la producción de este producto.

El costo por kg de la semilla de quinoa cruda en el periodo de 2017 a 2019 se reporta como de \$ 55.44 MXN por kg (Statista, 2020). En el caso de la harina de soya tiene un precio de \$ 7.23 MXN por kg (Department of Agriculture USA; World Bank, 2020). Por lo anterior el promedio del costo unitario para la semilla de huauzontle se estimó en \$ 31.33 MXN por kg. Por otro lado, el costo unitario del lactosuero en polvo para este trabajo se definió como de \$ 17.06 MXN por kg de polvos de suero lácteo basado en reporte de la literatura científica (Domínguez et al., 2017). Por último, el costo del maíz amarillo fue cotizado en la

distribuidora de granos Carlos Innes en la ciudad de Oaxaca; con un costo por kilogramo de maíz amarillo de \$ 3.50 MXN.

A continuación se elaboraron las restricciones nutricionales las cuales tiene una forma análoga a la función objetivo. Los requerimientos nutricionales de las gallinas de postura (Hy-Line w36) se tomaron de las recomendaciones del proveedor, las cuales se detallaron previamente en la Sección 2.3.2 Los requerimientos nutrimentales considerandos para la formulación del alimento balanceado en el presente proyecto, se tomaron como el promedio de los requerimientos nutricionales de las 5 sub-etapas correspondientes a la Etapa de Producción de Huevo como se muestra en la Tabla 13. (Composición recomendada de nutrientes para la etapa de postura de las gallinas de 18 a 90 semanas de edad). Con esta consideración se definieron los requerimientos nutrimentales para las gallinas de postura que debe cumplir el alimento balanceado formulado en este proyecto: 16.5% de proteína total (Ec. 4.13), el 0.86% de lisina (Ec. 4.14) y el 1.14% de metionina+cisteína (Ec. 4.15), como se indica en las ecuaciones siguientes:

$$P_h H + P_l L + P_m M \geq 16.5 \% \quad (\text{Ec. 4.13});$$

$$\text{Lis}_h H + \text{Lis}_l L + \text{Lis}_m M \geq 0.86 \% \quad (\text{Ec. 4.14});$$

$$(\text{m+c})_h H + (\text{m+c})_l L + (\text{m+c})_m M \geq 1.14 \% \quad (\text{Ec. 4.15});$$

donde  $P_h$  es el porcentaje de proteína contenido en el huauzontle,  $P_l$  es el porcentaje de proteína del lactosuero,  $P_m$  es el porcentaje de proteína del maíz amarillo;  $\text{Lis}_h$ ,  $\text{Lis}_l$  y  $\text{Lis}_m$  son los porcentajes de lisina del huauzontle, el lactosuero y el maíz amarillo, respectivamente;  $(\text{m+c})_h$ ,  $(\text{m+c})_l$  y  $(\text{m+c})_m$  son los porcentajes de metionina más cisteína del huauzontle, el lactosuero y el maíz amarillo, respectivamente. Cabe mencionar que estas restricciones son del tipo igual o mayor ( $\geq$ ) debido a que la cantidad aportada de proteína y aminoácidos no debe ser menor a los requerimientos nutricionales demandados por las gallinas en la etapa de producción de huevo.

Adicionalmente, además de las restricciones nutricionales, también se establecieron las restricciones generales de “no números negativos”, y las restricciones del peso total de la mezcla, Ecuaciones 4.16 y 4.17, respectivamente.

$$H + L + M \geq 0 \quad (\text{Ec. 4.16})$$

$$H + L + M \leq 100 \quad (\text{Ec. 4.17})$$

Una vez establecidas la función objetivo y las ecuaciones de las restricciones del problema, la optimización para minimizar el costo de producción se resolvió mediante la implementación de los algoritmos algebraicos iterativos del método Simplex como se mencionó en la Sección 2.7. Primero, se igualó la función objetivo a cero. Posteriormente, debido a que en este trabajo se busca la minimización de los costos de producción, se definió una restricción de tipo “ $\geq$ ”. A continuación se normalizaron las ecuaciones de las restricciones y la función objetivo, según el método Simplex de M-Grande, agregando las variables de holgura  $x_s$  y las variables artificiales  $y_r$  de acuerdo al método. Después de esto, se definió la tabla inicial Simplex con las ecuaciones normalizadas (Tabla 13).

**Tabla 13.** Tabla inicial Simplex, con la función objetivo y restricciones normalizadas mediante el modelo Simplex de la M-Grande.

|       | Z | H         | L         | M         | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ |      |
|-------|---|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| F.O.  | 1 | $\$_h$    | $\$_l$    | $\$_m$    | 0     | 0     | 0     | M     | M     | M     | 0    |
| $R_1$ | 0 | $P_h$     | $P_l$     | $P_m$     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 16.5 |
| $R_2$ | 0 | $Lis_h$   | $Lis_l$   | $Lis_m$   | 0     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0.86 |
| $R_3$ | 0 | $(m+c)_h$ | $(m+c)_l$ | $(m+c)_m$ | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 1     | 1.14 |

H es la cantidad de huauzontle, L la de lactosuero, y M la de maíz amarillo;  $\$_h$  es el costo por kilogramos de huauzontle,  $\$_l$  el costo por kilogramos de lactosuero,  $\$_m$  el costo por kilogramos de maíz amarillo; Z el costo total de elaboración,  $P_h$  es el porcentaje de proteína contenido en el huauzontle,  $P_l$  es el porcentaje de proteína del lactosuero,  $P_m$  es el porcentaje de proteína del maíz amarillo,  $Lis_h$ ,  $Lis_l$  y  $Lis_m$  es el porcentaje de lisina del huauzontle, el lactosuero y el maíz amarillo respectivamente,  $(m+c)_h$ ,  $(m+c)_l$  y  $(m+c)_m$  es el porcentaje de metionina más cisteína del huauzontle, el lactosuero y el maíz amarillo respectivamente.

La matriz ampliada formada por los datos de la tabla inicial Simplex, se resolvió mediante el método Simplex, el cual es un método iterativo que utiliza la reducción de Gauss Jordan como se describió en la Sección 2.7. Para realizar este procedimiento se utilizó una hoja de cálculo del programa Microsoft® Excel 2010 (Microsoft, EUA). El problema se resolvió mediante la utilización del comando “solver”, buscar objetivo, el cual utiliza el método Simplex para resolución ecuaciones lineales que se halla en el menú de herramientas de Excel.

#### **4.6 Elaboración y desarrollo del alimento balanceado para gallinas ponedoras**

En el apartado anterior se obtuvieron las cantidades de los ingredientes principales para la optimización del costo de la formulación del alimento balanceado para gallinas de postura. El alimento balanceado se elaboró mediante la combinación siguiendo la metodología que se describe a continuación. Primeramente, se mezclaron las harinas de las materias primas de la formulación en las cantidades que se obtuvieron en la optimización, seguido por la adición de piedra caliza como fuente de calcio (Scheideler *et al.*, 2005). Los ingredientes fueron mezclados por 3 min en una mezcladora modelo “OP” de la marca Century.

#### **4.7 Análisis proximal del producto final (alimento balanceado)**

Para el alimento balanceado se realizaron los mismos análisis proximales que se reportan en la Sección 4.1.1 para las determinaciones fisicoquímicas de huauzontle y de maíz amarillo (Tabla 11). Los resultados se contrastaron con los requerimientos nutricionales de las gallinas ponedoras (Hy-Line w36) y otros alimentos balanceados disponibles en el mercado avícola, comparando su aporte nutricional y particularmente su aporte proteico.

#### **4.8 Estimación de la cantidad de aminoácidos presentes en la proteína del alimento formulado**

Entre la formulación optimizada desarrollada y el alimento balanceado final existió una mínima variación de la cantidad de proteína obtenida de manera experimental con respecto a la estimada teóricamente. Para conocer esta variación se calculó el error que existe entre el valor estimado (valor calculado) y el real obtenido experimentalmente para el contenido proteico. En primer lugar se calculó el error absoluto, el cual se define como la diferencia entre el valor estimado y el valor real del contenido de proteína (Ecuación 4.18).

$$\Delta X = X - X_0 \quad (\text{Ec. 4.18});$$

donde:  $\Delta X$  es el error absoluto,  $X$  es el valor real (experimental) y  $X_0$  es el valor estimado (teórico). El error absoluto cuantifica la desviación en términos absolutos respecto al valor verdadero. Adicionalmente se calculó el error relativo, el cual se define como el cociente del error absoluto y el valor real, multiplicado por 100 (Ecuación 4.19). El error relativo aceptado para este proyecto es de 5% como máximo.

$$\varepsilon = \frac{|\Delta X|}{X}(100) \quad (\text{Ec. 4.19});$$

donde:  $\varepsilon$  es el error relativo,  $\Delta X$  es el error absoluto y  $X$  es el valor real (experimental).

## 5. Resultados y discusión

### 5.1 Caracterización fisicoquímica de la semilla de huauzontle

Las semillas de huauzontle usadas en este proyecto fueron caracterizadas mediante análisis proximales. En la Tabla 14, se muestran los resultados obtenidos para las semillas de huauzontle en relación a su contenido de cenizas, proteínas, grasa y fibra bruta. Los valores obtenidos en las determinaciones fueron comparados con la información reportada para este producto agrícola en la literatura científica (Hernández-Marín, 2020; Monterrubio *et al.*, 2020).

**Tabla 14.** Determinaciones proximales realizadas a muestras representativas de semillas del huauzontle en este trabajo así como las de reportes de la literatura científica.

| <b>Determinación</b> | <b>Este trabajo (%)</b> | <b>Hernández-Marín (2020) (%)</b> | <b>Monterrubio <i>et al.</i>, (2020) (%)</b> |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|
| Cenizas              | 7.94 ± 0.02             | 5.52 ± 0.04                       | 5.7 ± 0.2                                    |
| Grasa                | 4.91 ± 0.09             | 7.06 ± 0.11                       | 10.0 ± 0.1                                   |
| Fibra Bruta          | 4.64 ± 0.23             | 3.98 ± 0.88                       | 3.6 ± 0.1                                    |
| Proteína             | 28.41 ± 0.40            | 15.92 ± 0.12                      | 20.4 ± 0.3                                   |

Los valores expresados, son el promedio de 3 réplicas, con su desviación estándar. (m/m) (P < 0.05)

De los análisis fisicoquímicos realizados a la muestra de huauzontle, los de mayor relevancia para este proyecto son los del contenido de grasa y de proteína. El contenido de grasa obtenido fue de 4.91%, el cual es menor a lo reportado para este producto por Monterrubio *et al.* (2020), y también menor al compararlo con lo reportado por Hernández-Marín (2020). Por otra parte, el contenido de proteína de la muestra de semilla en este trabajo fue de 28.41%, el cual es considerablemente mayor al reportado en la literatura científica para este producto (Monterrubio *et al.*, 2020; Hernández-Marín, 2020).

Sin embargo existe una notable diferencia con el contenido de proteína total reportado para el huauzontle, con un incremento del 78 y 39% con respecto a lo reportado en la literatura científica por Hernández-Marín (2020) y Monterrubio *et al.* (2020) respectivamente. La

variación observada en los diferentes análisis fisicoquímicos, pero especialmente en el contenido de grasa cruda y proteína total es ocasionada principalmente por factores propios de productos naturales (cultivos agrícolas), como el tipo y composición del suelo, el clima, la disponibilidad de agua. Aún así, el elevado contenido proteico de la semilla de huauzontle usada en el presente trabajo es muy sobresaliente y hacen que merezca la pena investigar en trabajos posteriores los factores agroambientales que influyeron para que esta semilla tenga estas cantidades de proteína. Por otra parte, para cumplir con los objetivos de este proyecto se realizó el análisis del perfil de aminoácidos de la semilla de huauzontle. Los resultados se muestran en el siguiente apartado.

### 5.1.1 Determinación del perfil de aminoácidos del huauzontle

Debido a la relevancia de la calidad de proteína de las fuentes proteicas utilizadas en este proyecto y a la poca información encontrada al respecto en la literatura, se realizó la determinación del perfil de aminoácidos a la proteína del huauzontle. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Perfil de aminoácidos presentes en la proteína de la semilla de huauzontle.

| Aminoácidos                   | g a.a./100 g de proteína |
|-------------------------------|--------------------------|
| Ácido aspártico               | 4.56                     |
| Ácido glutámico               | 4.54                     |
| Serina                        | 3.95                     |
| Glicina                       | 5.42                     |
| <b>Lisina</b>                 | <b>7.76</b>              |
| Histidina                     | 1.78                     |
| Treonina                      | 19.00                    |
| Arginina                      | 7.57                     |
| Prolina                       | 5.70                     |
| <b>Cisteína</b>               | <b>0.03</b>              |
| Alanina                       | 5.30                     |
| Tirosina                      | 7.23                     |
| Valina                        | 2.29                     |
| <b>Metionina</b>              | <b>7.59</b>              |
| Isoleucina                    | 6.09                     |
| Leucina                       | 8.42                     |
| Fenilalanina                  | 0.47                     |
| <b>TOTAL (Proteína cruda)</b> | <b>97.84</b>             |

El análisis del perfil de aminoácidos realizado a la semilla de huauzontle usada en este estudio (Tabla 15) permitió conocer el contenido de los principales aminoácidos esenciales en las proteína de semillas de huauzontle. A diferencia de los valores reportados para las semillas de cereales y pseudocereales, la proteína de huauzontle contiene todos los aminoácidos esenciales en las cantidades mínimas requeridas para las gallinas de postura; en especial la metionina y la cisteína, dado que son los aminoácidos limitantes en las demás fuentes proteicas vegetales (Bojanic, 2011). Estos últimos son los principales aminoácidos requeridos en la alimentación de las gallinas, ya que permiten su adecuado funcionamiento fisiológico y la producción eficiente de huevo como lo muestra a continuación la Tabla 16.

**Tabla 16.** Composición promedio recomendada de nutrientes para las gallinas Hy-line w36 en el periodo de postura de la semana 18 a 90 (Hy-Line International, 2013).

| Semanas de edad  |             |
|--|-------------|
| 18 - 90  |             |
| Aminoácidos digestibles ideales /<br>Aminoácidos Totales (% <sup>1</sup> ) |             |
| Lisina   | 0.78 / 0.86 |
| Met+Cisteína   | 1.04 / 1.14 |
| Treonina   | 0.55 / 0.64 |
| Triptófano   | 0.16 / 0.20 |
| Arginina   | 0.81 / 0.87 |
| Isoleucina   | 0.61 / 0.66 |
| Valina   | 0.69 / 0.76 |
| <b>Proteína cruda</b>  | <b>16.5</b> |

<sup>1</sup> Porcentaje del producto seco

Se tomó como referencia el requerimiento promedio de aminoácidos del periodo de 18 a 90 semanas donde es mayor la demanda nutricional para la producción de huevo. De acuerdo a la Tabla 16, las gallinas de postura en la etapa de producción de huevo, requieren un aporte 16.5% de proteína bruta y de 0.86 y 1.14% de lisina y metionina+cisteína, respectivamente (% del total del producto seco), los cuales deben ser suministrados por la fuente proteica, del alimento balanceado. Considerando que en la actualidad la soya es la fuente de proteína más usada para estos fines, a continuación en la Tabla 17 se comparan los resultados del perfil de aminoácidos del huauzontle con los aminoácidos reportados en la literatura para la soya y los requerimientos de a.a. de las gallinas Hy-line w36 usadas como modelo de gallina ponedora en este proyecto.

**Tabla 17.** Comparativo entre el perfil de aminoácidos del huauzontle, soya y los requerimientos de aminoácidos de las gallinas Hy-line en el periodo de postura

|              | Aminoácidos Totales (% , g aa/100 g de proteína) |                           |                              |                   |
|--------------|--|---------------------------|------------------------------|-------------------|
|              | Requerimiento de las gallinas <sup>1</sup>       | Huauzontle (Este trabajo) | Huauzontle (Hernández-Marín) | Soya <sup>2</sup> |
| Lisina       | 5.23   | 7.76                      | 9.73                         | 3.30              |
| Met+Cisteína | 7.62   | 7.63                      | 6.79                         | 0.61              |
| Treonina     | 3.89   | 19.0                      | 15.45                        | 1.91              |
| Triptófano   | 1.21   | -                         | -                            | -                 |
| Arginina     | 5.28   | 7.57                      | 8.98                         | -                 |
| Isoleucina   | 4.01   | 6.09                      | 4.31                         | 2.4               |
| Valina       | 4.62   | 2.29                      | 1.48                         | 2.7               |

<sup>1</sup> (Hy-Line International, 2013)

<sup>2</sup> (Awadalkareem *et al.*, 2008)

El contenido de lisina de la muestra de huauzontle (7.75% g a.a. / 100g de proteína) fue menor al reportado por Hernández-Marín (2020) y poco más de dos veces mayor que el contenido reportado para la soya (3.30% g a.a. / 100g de proteína) por Awadalkareem *et al.* (2008), que como ya se ha mencionado es el grano más utilizado como fuente proteica para la elaboración de alimentos balanceados para gallinas ponedoras. Por otro lado, en el caso de los aminoácidos metionina+cisteína, que son los aminoácidos limitantes en las proteínas de semillas de leguminosas, el huauzontle usado en este trabajo tuvo un contenido del 7.62%, similar a lo reportado para el huauzontle por Hernández-Marín (2020) y mucho mayor al reportado para proteína de soya por Awadalkareem *et al.* (2008) de 0.61%. Con estos datos se puede afirmar que la soya no cubre los requerimientos de lisina y menos aún los de metionina que necesitan las gallinas ponedoras. Por otro lado, el huauzontle utilizado en este proyecto sí cubre de manera satisfactoria los requerimientos de estos aminoácidos recomendados para satisfacer la dieta de gallinas ponedoras Hy-line w36.

Considerando el elevado contenido de los aminoácidos lisina y metionina+cisteína en las semillas de huauzontle, que son dos de los aminoácidos más relevantes para la nutrición de las gallinas de postura Hy-line w36, se puede concluir que los granos de soya pueden ser sustituidos por el huauzontle como fuente proteica en la elaboración de alimentos balanceados. La determinación de las cantidades de esta semilla junto con el lactosuero que

se utilizarán en la formulación será descrita más adelante mediante la optimización del costo total de elaboración considerando los ingredientes principales y las necesidades nutricionales de las gallinas usando el método de programación lineal Simplex.

## 5.2 Caracterización del maíz amarillo

Los granos de maíz amarillo utilizados en este proyecto fueron caracterizados mediante la determinación del análisis proximal de este producto. En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos de los contenidos de cenizas, proteínas, grasa, fibra bruta y carbohidratos del maíz amarillo. Los valores obtenidos en las determinaciones fueron comparados con los datos reportados en la literatura para este producto. De acuerdo a los objetivos de este proyecto, los parámetros del proximal de mayor relevancia son los contenidos de proteína y carbohidratos, debido a que el maíz es el principal responsable del aporte energético (carbohidratos) al alimento balanceado.

**Tabla 18.** Análisis proximal realizado al maíz amarillo (humedad, cenizas, proteínas, grasa, fibra bruta y carbohidratos).

| Determinación        | (% <sup>1</sup> )  |
|----------------------|--------------------|
| Cenizas              | 1.63 ± 0.08        |
| <b>Proteína</b>      | 7.46 ± 0.07        |
| Grasa                | 7.00 ± 0.10        |
| Fibra Bruta          | 4.64 ± 0.20        |
| <b>Carbohidratos</b> | 67.99 <sup>2</sup> |

Los valores expresados, son el promedio de 3 réplicas.

<sup>1</sup> Porcentaje del producto base seca

<sup>2</sup> Calculado por diferencia

El contenido de cenizas en la muestra de maíz amarillo fue de 1.63%, valor cercano al reportado en la literatura de 1.46% por Mendoza *et al.* (2006). El contenido de grasa obtenido fue de 7.0% el cual también es muy cercano al reportado para el maíz amarillo del estado de Hidalgo de 6.04% (Ortíz, 2006). Por otro parte el contenido de proteína obtenido de la muestra fue 7.46%, siendo este valor similar a lo reportado por Ritva *et al.* (2011) con un rango de concentraciones entre 7.55 a 10.57%. Se puede concluir que los datos valores obtenidos se encuentran dentro de los parámetros encontrados en la literatura.

### 5.3 Caracterización del suero lácteo

El suero lácteo utilizado en este proyecto fue caracterizado mediante la realización de los análisis proximales como se indicó en la Sección 4.2 (Caracterización del lactosuero). En la Tabla 19 se muestran los resultados del análisis proximal del suero lácteo. Para fines del presente trabajo, el parámetro de mayor relevancia del análisis proximal es el contenido de proteína, debido a que se pretende que el suero lácteo deshidratado pueda, junto con el huauzontle, ayudar a complementar el contenido proteico del alimento balanceado para satisfacer las necesidades nutricionales de las gallinas ponedoras Hy-line w36.

**Tabla 19.** Análisis proximal realizado al suero lácteo (humedad, cenizas, proteínas, grasa, carbohidratos y densidad).

| Determinación                             | Suero lácteo<br>(ácido)<br>% (m/v) | PROY-NMX-<br>F-721-<br>COFOCALEC | Meneses y<br>Flores (2016) |
|---|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Humedad                                   | 93.48 ± 0.05                       | -                                | 93.1                       |
| Cenizas                                   | 0.54 ± 0.006                       | 0.53 min                         | -                          |
| Proteína                                  | 1.02 ± 0.05                        | 0.72 min                         | 0.49                       |
| Grasa                                     | 0.10 ± 0.0                         | 0.10 máx.                        | 0.02                       |
| Carbohidratos totales<br>(eq. de lactosa) | 4.89 ± 0.004                       | 4.7 min                          | 5.62                       |
| Densidad                                  | 1.02 ± 0.0004                      | -                                | -                          |
| pH  | 5.71 ± 0.007                       | < 6.4                            | 6.56                       |

Los valores expresados, son el promedio de 3 réplicas.

- No reportado

De acuerdo al pH del suero utilizado como materia prima y con base en el proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-F-721-COFOCALEC-2012, éste se clasifica como suero ácido. El contenido de humedad obtenido de la muestra de suero lácteo fue similar al reportado por Meneses y Flores (2016). El contenido de cenizas y grasa en la muestra fueron 0.54 y 0.10% respectivamente los cuales coinciden con los requerimientos de la norma. Por otra parte el contenido de proteína obtenido de la muestra fue de 1.02 %; valor que también se encuentra dentro de los parámetros reportados. Por último, el contenido de carbohidratos totales (4.89%) coinciden con lo reportado por Meneses y Flores (2019) y con los requerimientos de la Norma Mexicana PROY-NMX-F-721-COFOCALEC-2012. Los datos obtenidos se encuentran dentro de los parámetros encontrados en la literatura y los requerimientos establecidos por la norma para suero Norma Mexicana PROY-NMX-F-721-

COFOCALEC-2012. De acuerdo a esto se puede afirmar que los parámetros de suero lácteo utilizados en este proyecto corresponden a un producto característico.

#### **5.4 Micro y ultrafiltración del suero lácteo**

Para disminuir el efecto de taponamiento en el sistema de filtración, previo a la microfiltración, el suero lácteo fue sometido a un proceso de desengrasado. Gracias a este tratamiento el contenido de grasa del suero disminuyó del 1 al 0% favoreciendo así el proceso de filtración y la disminución del taponamiento de las membranas de microfiltración, debido a que la grasa es uno de los principales componentes responsables del taponamiento de membranas de micro y ultrafiltración (Walstra *et al.*, 2006).

En este proyecto el proceso de filtración se utilizó principalmente para la concentración de los sólidos totales del suero lácteo, en particular de la proteína. Tanto en el proceso de microfiltración como en el de ultrafiltración se alcanzó un factor de concentración volumétrico (FCV) de 3.5. Con la utilización de este factor de concentración se buscó reducir considerablemente la cantidad de agua en el concentrado de suero lácteo, así como obtener una mayor concentración de sólidos totales y proteína con el fin de obtener un mejor rendimiento de polvos en el proceso de secado.

Durante el proceso de filtración se observó una disminución en la velocidad de flujo la cual se atribuye al taponamiento o ensuciamiento progresivo de las membranas a medida que ocurre la filtración. Este fenómeno es común en los sistemas de filtración por membranas. La solución rápida para el taponamiento de las membranas fue aumentar la velocidad de flujo del sistema de filtración, pasando de 400 a 500 mL/min.

##### **5.4.1 Caracterización fisicoquímica de las fracciones obtenidas de la micro y ultrafiltración**

Para analizar el efecto del uso del sistema de filtración en los principales componentes del suero lácteo, se determinó la composición fisicoquímica de las fracciones de interés a partir de los procesos de membranas: retenido de la micro y de la ultrafiltración (Figura 14).

**Tabla 20.** Factor de concentración volumétrica y determinaciones proximales realizadas a las fracciones de interés resultantes de los procesos de micro y ultrafiltración del suero lácteo.

| Determinación                       | Suero lácteo<br>% (m/v) | Retenido<br>Microfiltración | Retenido<br>Ultrafiltración |
|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Factor de concentración volumétrico | 0                       | 3.5                         | 3.5                         |
| Proteína                            | 1.02 ± 0.05             | 0.96 ± 0.0                  | 1.17 ± 0.05                 |
| Lípidos                             | 0.10 ± 0.0              | 0.5 ± 0.0                   | 0 ± 0.0                     |
| Cenizas                             | 0.54 ± 0.006            | -                           | 0.53 ± 0.01                 |
| Sólidos totales                     | 6.52 ± 0.05             | 7.19 ± 0.009                | 6.74 ± 0.01                 |
| Densidad                            | 1.02 ± 0.0004           | 1.02 ± 0.0                  | 1.02 ± 0.001                |
| Carbohidratos totales               | 4.89 ± 0.004            | 4.71 ± 0.01                 | 5.44 ± 0.01                 |
| -                                   | No determinado          |                             |                             |

Como se puede observar en la Tabla 20, la mayor cantidad de proteína se encuentra concentrada en la fracción del retenido de la ultrafiltración (UF). La cual es significativamente mayor a la cantidad de proteína en el retenido de la microfiltración. Esto es debido a que la membrana de MF, por su tamaño de poro (0.45 µm), solo retiene el paso de una reducida cantidad de proteínas; a diferencia de la membrana de UF que tiene un peso molecular de corte de 10 kDa, restringiendo así el paso de proteínas a través de la membrana. Por otro lado la cantidad de sólidos es mayor en la fracción de MF en comparación de UF y aún mayor que en la alimentación.

Las fracciones concentradas tuvieron una mayor cantidad de carbohidratos totales de lo esperado, lo cual puede llegar a ser perjudicial para las gallinas (Alloui *et al.*, 2013). La mayor concentración de azúcares totales se puede atribuir a la formación de complejos de lactosa con otras macromoléculas como polímeros y proteínas; de manera que la lactosa no se permeó a través de las membranas de ultrafiltración como se esperaba.

El proceso de filtración favorece la etapa posterior de secado por aspersion, dado que durante la filtración se reduce considerablemente la cantidad de agua que se debe remover posteriormente en la etapa de secado. Adicionalmente la operación de secado por aspersion se hace más eficiente con mayores cantidades de sólidos en la solución a secar (Mondragón *et al.*, 2013). Con la finalidad de comparar los efectos de la filtración en las etapas de micro

y ultrafiltración, en la Tabla 21 se calcularon las concentraciones de proteína y sólidos totales.

**Tabla 21.** Comparación de contenido proteico, sólidos totales y factor de concentración de las operaciones de micro y ultrafiltración.

| Etapas de filtración | Contenido proteico (g/L)  |          | Factor de concentración proteico | Contenido de sólidos totales (g/L) |          | Factor de concentración de sólidos |
|----------------------|---------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------------|----------|------------------------------------|
|                      | Alimentación <sup>1</sup> | Retenido | FCp                              | Alimentación <sup>1</sup>          | Retenido | FCs                                |
| Microfiltración      | 10.39                     | 9.81     | 0.94                             | 63.59                              | 68.89    | 1.08                               |
| Ultrafiltración      | 9.32                      | 11.96    | 1.28                             | 62.26                              | 64.97    | 1.04                               |

<sup>1</sup> Se refiere al suero lácteo utilizado para la alimentación de la etapa de MF y al permeado de la MF utilizado para la alimentación de la UF.

Al comparar el factor de concentración volumétrico (FCV 3.5) en la etapa de microfiltración con el factor de concentración proteico (FCp 0.94), se puede observar que la concentración de proteína en el retenido de la MF disminuyó como se esperaba, debido a que el tamaño de poro es mayor al de las moléculas de proteína como lo reporta Meneses y Flores (2016). Esto se atribuye a que el tamaño de poro fue mayor al de las proteínas, dejándolas penetrar a través de la membrana en el permeado de la MF.

Por otra parte, en la etapa UF se observó un efecto contrario. El factor de concentración proteico aumentó ligeramente en el retenido de la UF pero no en la misma proporción del FCV, como lo reportado por Meneses y Flores (2016), donde el FCp tuvo valores similares al FCV. La concentración de sólidos fue prácticamente el mismo en la alimentación como en el retenido de la UF. Esto se atribuye a la penetración de los sólidos y las proteínas a través de la membrana de UF. Con los datos obtenidos se puede concluir que los resultados de la etapa de filtración por membranas no fueron los esperados para la concentración de proteína en el retenido de la UF; lo cual se atribuye a la interacción entre los componentes fisicoquímicos del suero lácteo entre sí mismos, y al tamaño de poro de las membranas utilizadas para los procesos de filtración. Por otra parte, el proceso de filtración cumplió su función primordial que es la remoción de agua del suero lácteo previo a la operación de secado por aspersión.

## 5.5 Secado del suero lácteo

Los polvos obtenidos después de proceso de secado de las fracciones de retenido de MF y de UF, presentaron diferentes características de color y de tamaño de partícula. Los polvos de la MF mostraron un color marrón tenue y un tamaño de partícula mayor con respecto a los polvos de la UF; siendo estos últimos polvos más finos y de color blanco. Para fines de este proyecto los polvos de ambas fracciones obtenidas del proceso de filtración por membranas (MF y UF) fueron combinados debido a que se pretende utilizar el suero lácteo en polvo como fuente de proteína para el alimento balanceado para gallinas de postura. Los polvos de suero lácteo se caracterizaron según las determinaciones fisicoquímicas que se muestran en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Análisis de proteína y humedad realizados a los polvos obtenidos de las fracciones de microfiltración y ultrafiltración secadas del suero lácteo.

| Determinaciones | Polvos Ultrafiltración | Polvos Microfiltración | Polvos Combinados <sup>1</sup> |
|-----------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Proteína %      | 14.69 ± 0.13           | 12.57 ± 0.28           | 13.63                          |
| Humedad %       | 2.51 ± 0.07            | 3.81 ± 0.13            | 3.16                           |
| Cenizas %       | 7.56 ± 0.03            | 7.20 ± 0.06            | 7.38                           |

(m/m).<sup>1</sup> Se calcularon estos valores mediante el promedio de los polvos de MF y UF

El contenido de proteína de la microfiltración fue de 12.65%. Por otro lado, el contenido proteico del retenido de la ultrafiltración fue ligeramente mayor (14.69%). Este resultado no coincide con la concentración de proteína reportada por Meneses y Flores (2019) en la fracción de UF (29.5%). Esto resultados podrían mejorarse utilizando un tamaño de corte de 5kDa para la membrana de UF. Esto haría posible la retención de los péptidos que resultan de la posible proteólisis de las proteínas en el proceso de elaboración de quesos. Por otra parte, el contenido de los polvos combinados fue de 13.63%, considerablemente mayor al 1% de proteína contenida en el suero lácteo original, además de la obtención de los polvos con baja humedad.

## 5.6 Formulación del alimento y optimización mediante el modelo de programación lineal

El problema de programación lineal se resolvió mediante la aplicación del método Simplex con la herramienta “solver” del programa de Microsoft Excel como se explicó en la Sección 4.5 (Formulación del alimento balanceado). De acuerdo a esto se encontró la solución óptima para la función objetivo, cumpliendo con las restricciones del problema de optimización establecidas en la Sección 4.5 (Tabla 13). Los resultados del problema de optimización que minimizan el costo de producción del alimento balanceado se muestran en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Formulación de costo optimizado para producir 100 kg de alimento balanceado para gallinas ponedora Hy-line w36 usando huauzontle, lactosuero y maíz amarillo como materias primas.

| Variables                   | Huauzontle | Lactosuero | Maíz A.                 | Total     |
|-----------------------------|------------|------------|-------------------------|-----------|
| Peso (kg)                   | 43.15      | 0          | 56.85                   | 100       |
|                             |            |            |                         | Costo min |
| Costo (\$)                  | 30.76      | 17.06      | 3.50                    | 1550.87   |
| Restricciones nutricionales |            |            | Nutrientes en alimentos | Holgura   |
| Proteína                    | 16.5       | ≥          | 16.5                    | 0         |
| Lisina                      | 0.86       | ≥          | 1.14                    | 0.28      |
| Met + Cis                   | 1.14       | ≥          | 1.18                    | 0.04      |

El problema de optimización consistió en encontrar las cantidades de las materias primas de estudio, huauzontle, lactosuero y maíz amarillo, requeridas para minimizar el costo total de la formulación dadas por la función objetivo y por las restricciones definidas en la Sección 4.5. De acuerdo a la solución del problema obtenida en este trabajo las cantidades de las materias primas requeridas para la formulación del alimento balanceado con costos optimizados son: H = 43.15, L = 0.0 y M = 56.85 kg, para el huauzontle, el lactosuero y el maíz amarillo, respectivamente, considerando una base de cálculo de 100 kg de alimento balanceado.

Los resultados fueron inesperados para la variable del lactosuero, ya que la solución óptima no indica la utilización de esta materia prima en la formulación del alimento balanceado. Esto se puede deber principalmente al extremadamente reducido aporte de los aminoácidos

metionina+cisteína (aminoácidos azufrados) del suero lácteo a la formulación en relación con su costo unitario. Debido a esto, y considerando que la función objetivo fue establecida con la finalidad de minimizar el costo de producción, la solución del problema de optimización se aleja del costo mínimo con el uso del suero lácteo, debido al costo estimado para esta materia prima con un aporte muy reducido de metionina+cisteína.

Por otro lado, aunque el costo unitario del huauzontle es más elevado que el del lactosuero, el huauzontle sí tiene un aporte importante de metionina+cisteína (4.6 veces mayor a la cantidad aportada por el lactosuero) a la formulación final. De acuerdo a estos resultados se puede concluir que la inclusión del lactosuero en la formulación no favorece la producción nutrimentalmente eficiente del alimento balanceado.

El costo del alimento balanceado por 100 kg de producto (\$ 1550.87 MXN) obtenido a partir de la resolución del problema de optimización, resultó ser considerablemente mayor comparado con el costo actual en el mercado del alimento balanceado para gallinas ponedoras de la marca Alpesur de \$ 980.00 MXN. Este resultado se atribuye al costo elevado del huauzontle considerado en este proyecto, el cual fue estimado con relación al costo de la quinoa, principalmente por las similitudes genéticas, y nula información reportada del huauzontle en este sentido.

El elevado costo de la quinoa que se consideró en este trabajo de acuerdo a Statista (2020) se puede atribuir a diversos factores que a continuación se describen en relación a la quinoa: i) cultivo desarrollado casi exclusivamente por pequeños productores de Bolivia, Perú y Ecuador; ii) se produce generalmente en condiciones artesanales de producción orgánica; iii) no tiene ni el trabajo de desarrollo biogenético ni el nivel de producción postcosecha como otros granos explotados a escalas industriales, como el maíz y la soya (FAO, 2013). Debido a estas limitaciones de producción y de comercialización, el precio de la quinoa es elevado en comparación con la soya, la fuente de proteína vegetal más utilizada para la elaboración de alimentos balanceados. Sin embargo, se prevee que mediante el impulso de la producción y explotación industrializada del huauzontle como una nueva fuente alternativa de proteína a mediano-largo plazo, el precio de este producto puede disminuir a niveles más competitivos en el mercado nacional de granos.

Por lo anterior la formulación del alimento balanceado con costo mínimo de producción consiste en 43.15 kg de huauzontle como fuente proteica y 56.85 kg de maíz amarillo como

fuerza de energía (carbohidratos), por cada 100 kg de alimento balanceado. Estas proporciones de las materias primas resultaron en una solución factible del problema de optimización al cumplir con todas las restricciones nutricionales planteadas para la etapa de producción de huevos que comprende de la semana 17 a la 90. Específicamente, la formulación optimizada cubre los requerimientos para proteína total de 16.5%. Asimismo, la formulación optimizada cubre los requerimientos de aminoácidos de 0.87% y 1.14% para lisina y metionina+cisteína, respectivamente, de acuerdo a la Tabla 25. Adicionalmente, esta formulación aporta un superávit de los de estos aminoácidos con respecto a lo requerido para la alimentación de las gallinas ponedoras Hy-line w36, con un aporte de 1.14% y 1.18%, respectivamente.

## **5.7 Desarrollo del alimento balanceado para gallinas ponedoras**

El alimento balanceado se elaboró mediante la combinación de los ingredientes de acuerdo a los resultados de la optimización para los ingredientes de la formulación que se reportó en la sección anterior: 56.85% de harina de maíz amarillo y 43.15% de harina de huauzontle como fuentes de carbohidratos y proteínas, respectivamente. Posteriormente se siguió la metodología descrita en la Sección 4.5.1. La simplicidad de este procedimiento fue debido a los pretratamientos aplicados a los ingredientes previamente como se describe en la Sección 4.0. Lo anterior permitió obtener un alimento balanceado de tipo puré, el cual favorece la rentabilidad, debido a que incentiva el bajo consumo de alimento en las gallinas y el rendimiento de la producción de huevo (Green, 1991). Adicionalmente, el alimento de tipo puré favorece la absorción de los nutrientes debido a la mayor superficie de contacto entre el alimento balanceado y el sistema digestivo de las gallinas (Green, 1991).

### **5.7.1 Caracterización fisicoquímica del alimento balanceado con formulación óptima para gallinas ponedoras**

El alimento balanceado para gallinas ponedoras con formulación óptima fue caracterizado mediante la determinación de su análisis proximal. En la Tabla 24 se muestran los resultados del análisis proximal para el contenido de humedad, cenizas, grasa, fibra bruta y proteínas del producto. Como se muestra en la tabla anterior, el contenido de proteína obtenido de la muestra fue 16.88%, el cual es ligeramente mayor al calculado teóricamente de 16.5%.

**Tabla 24.** Análisis proximal realizado al alimento balanceado óptimo para gallinas ponedoras Hy-line w36 conteniendo harinas de huauzontle y maíz amarillo como ingredientes principales.

| Determinación | % (m/m)            |
|---------------|--------------------|
| Humedad       | 4.19 ± 0.17        |
| Cenizas       | 3.46 ± 0.16        |
| Grasa         | 5.91 ± 0.27        |
| Fibra Bruta   | 3.29 ± 0.10        |
| Carbohidratos | 66.27 <sup>1</sup> |
| Proteína      | 16.88 ± 0.06       |

Los valores expresados, son el promedio de 3 réplicas.

<sup>1</sup> Calculado por diferencia

### 5.7.2 Estimación de la cantidad de aminoácidos presentes en la proteína del alimento formulado

Se pudo observar una pequeña variación entre la cantidad de proteína obtenida de manera experimental (16.88%) y la estimada teóricamente (16.5%) a partir de la optimización de la formulación. Para conocer esta variación se calculó el error que existe entre el valor estimado y el valor real obtenido experimentalmente. Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuaciones 4.18 y 4.19.

$$\varepsilon = \left[ \frac{|16.88 - 16.50|}{16.88} \right] (100) = 2.25 \%$$

Considerando que el error relativo es de 2.25%, se puede afirmar que se obtuvo un error relativo menor al máximo error establecido para este producto (5.0%). Con este resultado se puede concluir que no existe una diferencia significativa entre el valor estimado y el valor real de proteína contenida en el alimento balanceado para gallinas ponedoras Hy-line w36. Considerando lo anterior, se estimaron los contenidos reales de lisina y de metionina+cisteína en el alimento balanceado final, a partir de los resultados del modelo de optimización con base en el contenido de proteína real obtenida experimentalmente (Tabla 25). El contenido de proteína, lisina y metionina+cisteína siguen satisfacen incluso con un excedente los requerimientos nutricionales de las gallinas Hy-line w36 en la etapa productiva de huevo.

**Tabla 25.** Estimación de los contenidos reales de lisina y metionina+cisteína en el alimento balanceado optimizado final.

|                    | Cantidades estimadas (modelo E. lineales) | Cantidades ajustadas (resultados experimentales) | Requerimientos nutricionales de las gallinas en la etapa de postura |
|--------------------|---|--|---|
| Proteína cruda     | 16.50%                                    | 16.88%   | 16.5%   |
| Lisina             | 1.14%                                     | 1.16% <sup>1</sup>                               | 0.86%   |
| Metionina+cisteína | 1.18%                                     | 1.20% <sup>1</sup>                               | 1.14%   |

<sup>1</sup> valores ajustados con base en el contenido de proteína experimental.

Por otro lado, se comparó el contenido de proteína del producto desarrollado en este proyecto con respecto a alimentos balanceados comerciales disponibles en el mercado. Desafortunadamente para fines de este comparativo, la mayoría de los productores de alimentos balanceado comerciales se reservan la información detallada de la composición fisicoquímica de sus productos y menos aún reportan el perfil de aminoácidos de estos productos. En el caso de los productos considerados en este estudio para realizar la comparación, las marcas Purina y Solla únicamente informan el contenido de proteína bruta en las etiquetas de sus productos.

**Tabla 26.** Comparativo del contenido de proteína del alimento desarrollado con dos alimentos comerciales.

|                | ALIMENTOS COMERCIALES            |                        |                     |
|----------------|----------------------------------|------------------------|---------------------|
|                | Alimento balanceado desarrollado | Purina Aves de postura | Solla Ponedoras     |
| Proteína bruta | 16.88 ± 0.06                     | 16.0 % <sup>1</sup>    | 15.5 % <sup>2</sup> |

<sup>1</sup> <https://zoobodega.com/aves-de-postura/95-layina.html>

<sup>2</sup> <https://www.solla.com/productos/avicultura/ponedoras-i>

Como se observa en la Tabla 26, el contenido de proteína bruta presente en el alimento desarrollado en este proyecto es ligeramente mayor que el contenido reportado por los productos comerciales comparados. Considerando lo anterior, se puede afirmar que el

aporte proteico del alimento balanceado desarrollado en este proyecto está de acuerdo a los productos comerciales disponibles en el mercado y más aún cumplen con los requerimientos de calidad de aminoácidos recomendados para las gallinas Hy-line w36 en la etapa de producción de huevo.

## 6. Conclusiones

- ❖ Se realizó el análisis fisicoquímico de tres ingredientes principales propuestos en este proyecto: maíz amarillo, suero lácteo y huauzontle, para la caracterización de las materias primas utilizadas para la elaboración de un alimento balanceado para gallinas de postura de la línea Hy-line w36. Asimismo, se realizó el análisis del perfil de aminoácidos del huauzontle.
- ❖ Se realizó el procesamiento de tres ingredientes principales propuestos en este proyecto: maíz amarillo, suero lácteo y huauzontle, para la elaboración de un alimento balanceado para gallinas de postura de la línea Hy-line w36. Asimismo, se obtuvo un polvo de suero lácteo usando procesos de micro y ultrafiltración, y secado por aspersión. Obteniendo polvos del lactosuero con un contenido de proteína de 13.68%
- ❖ A partir de los datos fisicoquímicos obtenidos de los principales ingredientes propuestos en este proyecto: maíz amarillo, polvos de suero lácteo y huauzontle, así como el análisis de aminoácidos de este último, se desarrolló un modelo de programación lineal para minimizar el costo de producción considerando los requerimientos de proteína bruta, lisina y metionina+cisteína usando el método Simplex. A partir de la solución del modelo se obtuvo una formulación óptima que consistió en 43.15 kg de huauzontle como fuente proteica y 56.85 kg de maíz amarillo como fuente de energía (carbohidratos), por cada 100 kg de alimento balanceado. La formulación de costo optimizada no incluyó el uso del suero lácteo en polvo como fuente de proteína debido principalmente al bajo contenido de metionina+cisteína.
- ❖ Se elaboró el alimento balanceado según la formulación óptima, en el que se determinó un contenido de proteína del 16.88%, que cubre las necesidades proteicas de las gallinas ponedoras de la línea Hy-line w36 en la etapa de producción. Asimismo los contenidos estimados de los aminoácidos limitantes lisina y metionina+cisteína de 1.16% y 1.20%, respectivamente en el alimento balanceado final, satisfacen los requerimientos de estos aminoácidos reportado para estas gallinas por el proveedor. Este resultado adquiere mayor importancia considerando que estos aminoácidos son limitantes en otras fuentes de proteínas de origen vegetal,

como las leguminosas y los cereales. Adicionalmente el huauzontle resultó ser una fuente de proteína (28.41%) de alta calidad por su importante contenido de metionina+cisteína (2.32%) (aminoácidos azufrados), los cuales son limitantes en las proteínas de cereales y leguminosas.

- ❖ A partir de este proyecto se puede afirmar que es posible sustituir a la soya por el huauzontle como fuente de proteína alternativa, en la elaboración de alimentos balanceados para gallinas ponedoras. Aunado a lo anterior el alimento balanceado elaborado en este proyecto no requiere la adición de ninguna fuente externa de aminoácidos, como muy probablemente se hace en los productos industriales, lo cual elevaría considerablemente su costo de producción.
- ❖ Finalmente a partir de los excelentes resultados obtenidos en este trabajo, se considera que dicho trabajo contribuye significativamente a la valorización de un cultivo endémico de México, el huauzontle, que a su vez puede impulsar la reactivación de su cultivo, para su uso como fuente proteica de alta calidad en la elaboración de alimentos balanceados para animales, así como en la alimentación humana.

## **7. Perspectivas**

Considerando los resultados obtenidos en este estudio, se debe realizar un análisis de aminoácidos del alimento balanceado, con el fin de corroborar el contenido de lisina y metionina+cisteína. Adicionalmente, considerando los resultados obtenidos se sugiere la elaboración de pruebas del alimento balanceado en gallinas Hy-line w36, para determinar el rendimiento del alimento balanceado formulado en este proyecto en la producción de huevo, y su comparación con los rendimientos obtenidos con alimentos balanceados tradicionales a base de soya. Para realizar lo anterior y como objetivo emanado del presente proyecto se propone implementar la producción a nivel escala piloto del alimento balanceado.

## 9. Referencias

- Aghaei A., Tabatabaei S., Chaji M., and Nazari M. (2010). Effects of dried whey (prebiotics) and probiotics in laying hen's performance and intestinal flora. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, (15) 9, 1996-2000.
- Alais C. (1988). *Ciencia de la leche. Principios de técnica lechera*. CIA Editorial Continental S.A. de C.V., México.
- Alloui M. N., Szczurek W. and Swiatkiewicz S. (2013). The usefulness of prebiotics and probiotics in modern poultry nutrition. *Annals of Animal Science*. (1), 17-32.
- Anandharamkrishnan C. and Ishwarya P. (2015). *Spray drying techniques for food ingredient encapsulation*. 1<sup>a</sup> Edition: John Wiley and Sons. Chicago E.U.
- Anthony J. C., Anthony T.G., Kimball R.S. and Jefferson Vías L.S. (2001). Señalizaciones involucradas en el control de la traducción de la síntesis de proteínas en el músculo esquelético por leucina. *J Nutr* , 131, 856S - 860S.
- Assad-Bustillos, M., Ramírez-Gilly, M., Tecante, A. and Chaires-Martínez, L. (2014). Baldasso C., Barros T. C y Tessaro I. C. (2011). Concentración y purificación de proteínas de suero por ultrafiltración. *Desalinización*, 278, 381 - 386.
- AOAC. (2019). *Association of Official Analytical Chemists*. 21 st Edition.
- Awadalkareem A. M., Mustafa A. I. and El-Tinay A. H. (2008). Protein, Mineral content and amino acid profile of sorghum flour as influenced by soybean protein concentrate supplementation. *Pakistan Journal of Nutrition*, (3) 7, 475-479.
- Barrón-Yáñez, M.R., Villanueva-Verduzco, C., García-Mateos, M.R., Colinas-León, M.T. (2009). Valor nutritivo y contenido de saponinas en germinados de huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* Saff.), calabacita (*Cucurbita pepo* L.), canola (*Brassica napus* L.) y amaranto (*Amaranthus leucocarpus* S. Watson syn. *hypochondriacus* L.). *Revista Chapingo. Serie horticultura* 3, 237-243.
- Bojanic A. (2011). La Quinoa: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. (37). Recuperado de <http://www.fao.org/3/aq287s/aq287s.pdf>.
- Bol. Soc. Bot. México. (1993). *Sociedad Botánica de México*. Números 53-54.
- Bos C., Gaudichon C. y Tome D. (2000). Criterios nutricionales y fisiológicos en la evaluación de la calidad de la proteína de la leche para humanos. *J Am Coll Nutr*, 19, 191S - 205S.
- Brady K., Ho C-T., Rosen R. T., Sang S. and Karwe M. V. (2007). Effects of processing on the nutraceutical profile of quinoa. *Food Chem*. (3) 100, 1209–1216.

- Bylund G. (1995). Dairy processing handbook. Tetra Pak Processing Systems AB. Lund Sweden.
- Caro-Greiffenstein, A. (1998). Breves normas de control de calidad. Quito, Ecuador: Proyecto financiado por el gobierno los países bajos.
- Carrera C. S., Reynoso C. M., Funes G. J., Martínez M.J., Dardanelli J. and Resnik S.L. (2011). Amino acid composition of soybean seeds as affected by climatic variables. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, (12) 46, 1579-1587.
- Checa Peralta J. O. (2013). Construcción de un secador por aspersión a escala laboratorio y su evaluación con jugo de jitomate (*Solanum Lycopersicum*). Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, México.
- Ciora R. J. and Liu, P. K. (2003). Ceramic membranes for environmental related applications. *Fluid/Particles Separation Journal*, (1) 15, 51-60.
- Craciunescu C., Albright C., Mar M.H., Song J. and Zeisel S. (2003). Choline availability during embryonic development alters progenitor cell mitosis in developing mouse hippocampus. *J Nutr*, (11) 133, 3614-3618.
- Domínguez, A., Cantú, D., Ragazzo, J., Andrade, I and Luna, G. (2017). Energy requirements and production cost of the spray drying process of cheese whey. *Drying Technology*, (5) 36.
- Elizalde A. D., Porrilla Y. P. y Chaparro D. C. (2009). Factores en semillas comestibles. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, (1) 7, 46 – 54.
- Fevold H. (1951). Proteínas del huevo, *Avances en química de proteínas*, 187-252.
- Food and Agriculture Organization. (1995). Management of food and nutrition projects in communities. Recuperado de <http://www.fao.org/3/v6465s/v6465s.pdf>.
- Food and Agriculture Organization. (2013). Tendencias y perspectivas del comercio internacional de quinua. Documento conjunto de la FAO.
- From huauzontle seeds (*Chenopodium berlandieri* spp. *nuttalliae*). *Agrociencia*, (8) 48.
- Gharsallaoui A., Roudaut G., Chambin C., Voille A. and Saurel R. (2007). Applications of spray drying in microencapsulation of food ingredients: an overview. *Food Research International*, (9) 40, 1107-1121.
- Gilani A., Kermanshahi H., Golian A. and Tahmasbi A. (2013). Impact of sodium bentonite addition to the diets containing cottonseed meal on production traits on Hy-line w36 hens. *J Anim Plant Sci*, (2) 23, 411–415. Recuperado de <http://thejaps.org.pk/docs/v-23-2/13.pdf>.

Gonzales J., Konishi Y., Bruno M., Valoy M., and Prado F. (2011). Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, (6) 92.

Green, S. (1991). Hens fed coarse meals devour profits. *Feedstuffs*, (63)11.

Hall W., Millward S., Long S. and Morgan L. (2003). Casein and whey exert different effects on plasma amino acid profiles, gastrointestinal hormone secretion and appetite. *British journal of nutrition*, 89, 239 – 248.

Hernández-Valles, S. (2017). Huauzontle, planta mexicana nutritiva y curativa, pero poco valorada. *NTX Salud y Ciencia*. Publicad en línea en <http://www.notimex.gob.mx/ntxnotaLibre/452621>.

Hernández Y. (2017). Desarrollo de una bebida probiótica a partir de proteínas de suero lácteo obtenidas mediante micro y ultrafiltración. Tesis para obtener el grado de Ingeniero. Universidad tecnológica de la mixteca.

Hiramoto K., Muramatsu T. and Okumura J. (1990). Effect of methionine and lysine deficiencies on protein synthesis in the Liver and oviduct and in the whole body of laying hens. *Poultry science*, (69), 84 – 89. <https://doi.org/10.3382/ps.0690084>.

HY-LINE INTERNATIONAL. (2016). Guia de manejo, hy-line w – 36. Recuperado de [http://www.hyline.com/userdocs/pages/36\\_COM\\_SPN.pdf](http://www.hyline.com/userdocs/pages/36_COM_SPN.pdf).

Iglesias O. and Hall G. M. (1997). Functional properties of dried milk whey Propiedades funcionales de suero de leche deshidratado. *Food science and technology international*, (3). <https://doi.org/10.1177/108201329700300509>.

Industrias Avícolas. (2018). Empresas líderes, (65) 4, 20-26. Recuperado de <http://www.WATTAgNet.com>.

ISTA Mielke GmbH, Oil World; US Department of Agriculture; World Bank. Recuperado de: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=soybean-meal>.

World Bank. (2020). Recuperado de: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=fish-meal>.

Jeantet R., Roignant M. y Brulé G. (2005). Ingeniería de los procesos aplicada a la industria láctea. Zaragoza, España: ACRIBIA, S.A.

Joven S.L., Sarda X., and Rosenberg M. (1993) Microencapsulating properties of serum proteins. *Fat Microencapsulation Anhydrous Milk*. *Journal of dairy science*, (10) 77, 2868-2877.

Kovacs-Nolan J., Phillips M. and Mine Y. (2005). Advances in the value of eggs and egg components for human health. *J. Agric. Food Chem*, (22) 53, 8421–8431.

Kwok K. C., Qin W. H. and Tsang J. C. (1993). Heat inactivation of trypsin inhibitors in soymilk at ultra- high temperatures. doi: 10.1111/j.1365-2621.1993.tb09377.x.

La Asociación de Oficiales de Control de Alimentos de EE. UU. (AAFCO). (2010)  
Lacaille-Dubois M. and Wagner H. A. (1996). Review of the biological and pharmacological activities of saponins. *Phytomedicine*, (4) 2, 363-386.

Lazo-Vélez M. A., Guajardo-Flores D., Mata-Ramírez D., Gutiérrez-Uribe J. A. and Serna-Saldivar S. O. (2016). Characterization and quantitation of triterpenoid saponins in raw and sprouted *Chenopodium berlandieri* spp.(Huauzontle) grains subjected to germination with or without selenium stress conditions. *Journal of food science*, (1) 81.

Londoño-Uribe M. M., Sepúlveda-Valencia J. U., Hernández-Monzón A. y Parra-Suescún J. E. (2008) Bebida fermentada de suero de queso fresco inoculada con *Lactobacillus casei*. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 61, 4409–4421.

López-Monterrubio D., Lobato-Calleros C., Alvarez-Ramírez J. and Vernon-Carter E. (2020). Huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* Saff.) protein: Composition, structure, physicochemical and functional properties. *Food Hydrocolloids*, (108).

Maradini A. M., Ribeiro M., Da Silva J. T., Pinheiro H. M., Paes J. B. and Dos Reis J. S. (2017). Quinoa: Nutritional, functional, and antinutritional aspects, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, (8) 57, 1618-1630. doi: 10.1080/10408398.2014.1001811.

Mendoza M., Andrio E., Juárez J. M., Mosqueda C., Latournerie L., Casteñón G., López A. and Moreno E. (2006). Contenido de lisina y triptófano en genotipos de maíz de alta calidad proteica y normal. *Publicaciones Uciencia*, (2) 22, 151-161.

Mondragón R., Julia J. E., Barba A. y Jarque J. C. (2013). El proceso de secado por atomización: formación de gránulos y cinética de secado de gotas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, (4) 52, 159–168.

Nisbet A. D., Saundry R. H., Moir A. J. G., Fothergill L. A., and Fothergill J. E. (1981). The complete amino-acid sequence of hen ovalbumin. *The febs journal*, (2) 115, 335–345.

NOM-155-SCFI. (2012). Leche-denominaciones, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba.

NOM-184-SSA1. (2002). Productos y servicios. Leche, fórmula láctea y producto lácteo combinado. Especificaciones sanitarias.

NMX-F-068-S. (1980). Alimentos. Determinación de proteínas.

NMX-F-089-S. (1979). Determinación de extracto etéreo (método soxhlet) en alimentos.

- NOM-F-090-S. (1978). Determinación de fibra cruda en alimentos.
- NMX-F-317-S. (1978). Determinación de pH en alimentos. Normas mexicanas.
- NMX-F-607-NORMEX. (2002). Alimentos-determinación de cenizas en alimentos.
- Olivares S., Soto D., y Zacarías I. (1989). Nutrición, prevención de riesgos y tratamiento dietético. CONFELANYD, 8-13.
- Olugbemi T. S., Mutayoba S. K. and Lekule F. P. (2010). Effect to moringa (*Moringa Oleifera*) inclusión in cassava based fed to broiler chickens. *International journal of poultry science*, (4) 9, 363–367.
- Optimum nutrition. (2019). The World's Best Selling Whey Protein. Recuperado de <http://www.optimumnutrition.com/en-us>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Recuperado de [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues\\_papers/Issues\\_papers\\_SP/La\\_agricultura\\_mundial.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1985). Energy and Protein Requirements. Technical Report Series. Geneva: World Health Organization.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2005). Mejore la alimentación de sus aves y aumente la producción. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-au201s.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2011). La quinoa: cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria del mundo. Recuperado de <http://www.fao.org/3/aq287s/aq287s.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2003). Tabla de composición de alimentos de América Latina. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-y4705s.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2005). Con concentrados caseros mejorar la alimentación de sus aves y aumente la producción. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-au201s.pdf>.
- Ortega R. M., López A. M., Requejo A. M. y Andrés P. (2004). La composición de los alimentos. Madrid, España: Editorial Complutense.
- Ortíz S. A. (2006). Determinación de la composición química proximal y fibra dietaria de 43 variedades criollas de maíz de 7 municipios del sureste del estado de Hidalgo. Tesis para obtener el grado de Licenciado. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias de la Salud, Área académica de Nutrición. Pachuca, Hidalgo, México.

Osborne T. B. and Thomas B. (1924). The vegetable proteins. Longmans Green and Company. New York, USA.

Pineda-Quiroga C., Atxaerandio R., Zubiria I., Gonzalez-Pozuelo I., Hurtado A., Ruiz R. and García-Rodríguez A. (2017). Productive performance and cecal microbial counts of floor housed laying hens supplemented with dry whey powder alone or combined with *Pediococcus acidilactici* in the late phase of production. *Livestock Science*, (195), 9-12.

Pirie N.W and Swaminathan M.S., (1975). International biological programme: Food Protein Sources, (4). CUP Archive, Cambridge.

Poosuwan K., Bunchasak C. and Kaewtapee C. (2010). Long - term feeding effects of dietary protein levels on egg production, immunocompetence and plasma amino acids of laying hens in subtropical condition. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, (94) 2. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2008.00898.x>.

PROY-NMX-F-721-COFOCALEC. (2012). Sistema producto leche – alimentos – lácteos – suero de leche (liquido o en polvo) – especificaciones y métodos de prueba. Organización Nacional de Normalización del COFOCALEC.

Quispe-Fuentes I., Vega-Gálvez A., Miranda M., Lemus-Mondaca R., Lozano M. and Ah-Hen K. (2012). A kinetic approach to saponin extraction during washing of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) sedes. *Journal of food process engineering*, (36) 2. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2012.00673.x>

Ritva A. M., Valencia R. C., and Serna L, A. (2011). Quínoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.) as a source of dietary fiber and other functional components. *Ciência E Tecnol. Aliment.* (31), 225–230. doi:10.1590/S0101-20612011000100035.

Rumpold A. and Schluter K. (2013). Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, (17), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.11.005>.

Safaa H. M., Jiménez-Moreno E., Valencia D. G., Frikha M., Serrano M. P. and Mateos G. G. (2005). Effect of main cereal of the diet and particle size of the cereal on productive performance and egg quality of brown egg-laying hens in early phase of production. *Poultry science*, (88), 608-604.

Safford W.E. (1916). An economic *Amaranthus* of ancient America. *Science* 1146, 870.

Saini H. S. (1989). Thermal stability of protease inhibitors in some cereals and legumes. doi: 10.1016/0308-8146(89)90008-3.

Sastre A., Ortega R., Tortuero F., Suárez G., Vergara G., López C and Fernández M. (2003). Formación, estructura y composición del huevo. (Ed). El libro del huevo, 21-27. Ed Instituto de Estudios del Huevo.

Sastre-Gallego A. G., Sastre-Gallego R. M., Tortuero-Cosialls D. F., Suárez-Fernández G., Vergara-García G. y López-Nomdedeu C. (2002). Composición y valor nutritivo del Huevo. Lecciones sobre el Huevo. Segunda edición, Ed Instituto de Estudios del Huevo. Madrid, España, 156-166.

Scheideler S. E., Beck M. M., Abudabos A. and Wyatt C.L. (2005). Multiple-enzyme (Avizyme) supplementation of corn-soy-based layer diets. Poultry Science Association, Inc. (14), 77-86.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2015). Tablas de balanza disponibilidad consumo nacional anual de soya 2009 a 2015. Recuperado de <http://datos.gob.mx/busca/dataset/balanzas-disponibilidad-consumo-nacional/resource/b80c6cf2-efbb-4591-a0d5-1141a39e596b>.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2018). Boletín de leche. Recuperado de <http://infosiap.siap.gob.mx/opt/boletlech/Bolet%C3%ADn%20de%20Leche%20eneromazo%202018.pdf>.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018). Boletín mensual de avance de la producción de huevo para plato. Recuperado de <http://www.gob.mx/siap/documentos/boletin-mensual-de-avances-de-la-produccion-huevo-para-plato-105462>.

Shewry P. R. and Casey R. (1999). Seed proteins. Netherlands. Springer.

Singh R. P. and Heldman D. (2009). Introduction to food engineering. Academic Press. E.U.

Stadelman W. J. & Cotterill O. J. (Ed) (2001). Egg science and technology. New York, E.U: Avi Publ.

Statista. (2020). Recuperado de <https://www.statista.com/statistics/520974/average-price-of-quinoa-worldwide/#:~:text=The%20global%20average%20price%20of,U.S.%20dollars%20on%20average%20worldwide>.

Stehfest E., Bouwman A.F., Van Vuuren D.P., Den Elzen M.G.J., Eickhout B., Jeuken M. . . Oorschot M. y Kabat P. (2008). Niet-CO2-emissies uit landbouw. Vleesconsumptie en klimaatbeleid, 14-15.

Suárez M. M., Kizlansky A. y López, L. (2006). Evaluación de la calidad de las proteínas en los alimentos calculando el escore de aminoácidos corregido por digestibilidad. *Nutrición Hospitalaria*, (1) 21, 47-51.

Villegas de Gante A. (2004) *Tecnología quesera*, Primera Edición. México.

Walstra P, M. Wouters J. T. and J. Geurts T. (2006) *Dairy science and technology*, Second Edition. Taylor and Francis Group, Boca Raton.

Zeisel S. (2000). Choline: an essential nutrients for humans. *Nutrition*, (7-8) 16, 669-671.

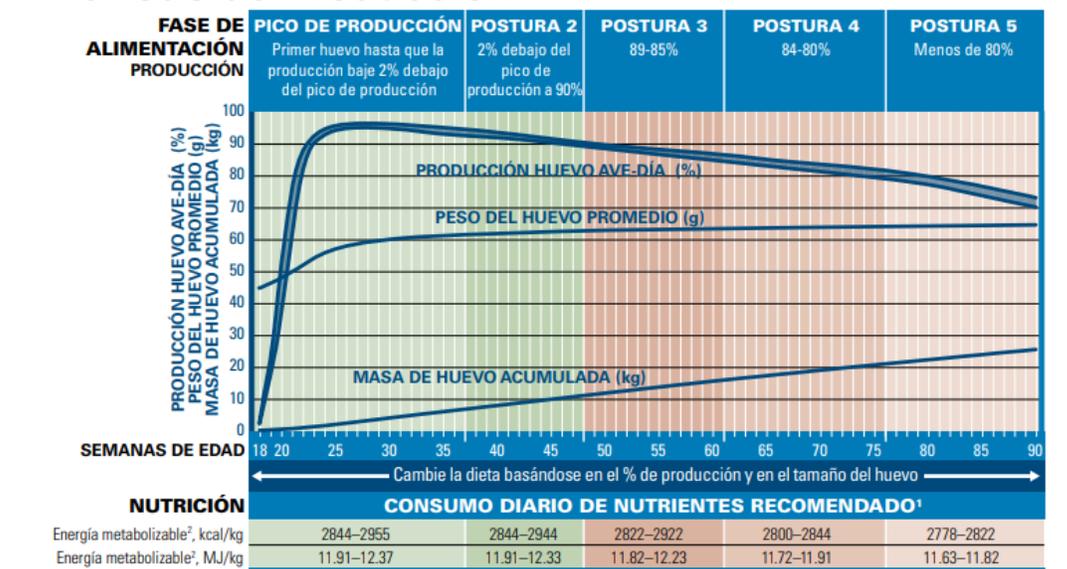
## 10. ANEXOS

### Anexo 1. Recomendaciones de nutrición durante el periodo de producción

PONEDORAS COMERCIALES HY-LINE W-36

<< Regresar al índice

## Recomendaciones de Nutrición Durante el Período de Producción



(Hy-Line International, 2013)

### Anexo 2. Datos y curva de calibración para la determinación de azúcares reductores directos (lactosa).

Absorbancias y concentraciones de los puntos utilizados para la curva de calibración.

| # | Concentración | Abs   |
|---|---------------|-------|
| 0 | 0             | 0     |
| 1 | 67.46         | 0.156 |
| 2 | 134.53        | 0.294 |
| 3 | 201.2         | 0.476 |
| 4 | 266.66        | 0.627 |
| 5 | 332.52        | 0.744 |
| 6 | 399.03        | 0.894 |

Curva de calibración obtenida con un  $R^2$  de 0.9981 y ecuación:  $0.0023x + 0.0046$

