



# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN  
Y SERVICIO EN ZOOTECNIA**

**POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL**

**COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y CALIDAD FÍSICA DE HUEVO EN  
RESPUESTA A LA SUPLEMENTACIÓN DE CROMO Y COBRE**

**TESIS**

Que como requisito parcial  
para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA**

Presenta:

**JORGE ADÁN HERNÁNDEZ ARGUELLO**

Bajo la supervisión de: **MARIANO J. GONZÁLEZ ALCORTA, Ph.D.**



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Julio de 2010

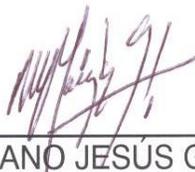
Chapingo, Estado de México

**COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y CALIDAD FÍSICA DE HUEVO EN  
RESPUESTA A LA SUPLEMENTACIÓN DE CROMO Y COBRE**

Tesis realizada por **JORGE ADÁN HERNÁNDEZ ARGUELLO** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

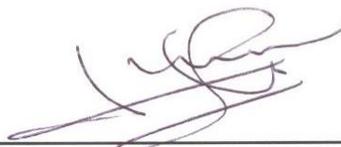
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA**

**DIRECTOR:**



\_\_\_\_\_  
Ph.D. MARIANO JESÚS GONZÁLEZ ALCORTA

**ASESOR:**



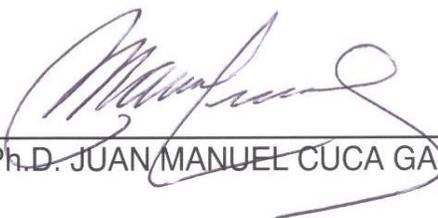
\_\_\_\_\_  
Ph.D. MAXIMINO HUERTA BRAVO

**ASESOR:**



\_\_\_\_\_  
M.C. SILVIA CARRILLO DOMÍNGUEZ

**ASESOR:**



\_\_\_\_\_  
Ph.D. JUAN MANUEL CUCA GARCÍA

## CONTENIDO

LISTA DE CUADROS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	viii
DATOS BIOGRÁFICOS.....	ix
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1 Marco contextual .....	3
2.1.1 El huevo y las enfermedades cardiovasculares .....	3
2.1.2 Importancia del huevo en la nutrición humana .....	4
2.1.3 Producción actual de huevo en México .....	6
2.1.4 Impacto de la investigación .....	8
2.2 Marco conceptual .....	9
2.2.1 Importancia de los minerales en la nutrición avícola .....	9
2.3 Cromo.....	10
2.3.1 Propiedades químicas.....	10
2.3.2 Funciones.....	11
2.3.3 Absorción y transporte .....	12
2.3.4 Signos de deficiencia .....	14
2.4 Cobre.....	15
2.4.1 Propiedades químicas.....	15
2.4.2 Funciones.....	16
2.4.3 Absorción y transporte .....	17
2.4.4 Signos de deficiencia .....	18

2.4.5	Comportamiento productivo en respuesta a la suplementación de cromo y cobre.....	19
2.4.6	Calidad física del huevo .....	19
2.5	Literatura citada.....	22
3.	COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y CALIDAD FÍSICA DE HUEVO EN RESPUESTA A LA SUPLEMENTACIÓN DE CROMO Y COBRE.....	27
3.1	Resumen .....	27
3.2	Abstract .....	28
3.3	Introducción.....	29
3.4	Materiales y métodos.....	31
3.5	Resultados y discusión .....	36
3.6	Conclusiones .....	55
3.7	Literatura citada.....	56

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Composición de grasas y contenido de colesterol <sup>z</sup> en el huevo fresco.....	4
Cuadro 2. Perfil de ácidos grasos del huevo de gallina. ....	5
Cuadro 3. Signos y síntomas de deficiencia de cromo. ....	15
Cuadro 4. Tratamientos <sup>z</sup> y dieta base usada durante el experimento.....	33
Cuadro 5. Comportamiento productivo de gallinas suplementadas con cromo y cobre durante 12 semanas de experimentación, en porcentaje de postura (PPOST), consumo diario de alimento (CONSUMO) por ave, masa diaria de huevo (MDH) y conversión alimenticia (CA).....	39
Cuadro 6. Estimadores del análisis de regresión para las variables de comportamiento productivo en gallinas suplementadas con cromo (NCr) y cobre (NCu) en la dieta.....	42
Cuadro 7. Niveles óptimos biológicos de cobre (NCu) y cromo (NCr) suplementario en dieta para gallinas de postura.....	43
Cuadro 8. Calidad física del huevo de gallinas suplementadas con cromo (Cr) y cobre (Cu) durante 12 semanas de experimentación. ....	47
Cuadro 9. Estimadores del análisis de regresión para las variables de calidad de huevo <sup>z</sup> en gallinas suplementadas con cromo (NCr) y cobre (NCu) en la dieta.....	49
Cuadro 10. Estimadores del análisis de regresión para las variables acumulativas de comportamiento productivo en gallinas suplementadas con cromo (NCr) y cobre (NCu) en la dieta. ....	52
Cuadro 11. Niveles óptimos de suplementación de cromo (NCr) y cobre (NCu) conforme al objetivo de optimización. ....	53
Cuadro 12. Calculo del precio de inclusión del picolinato de cromo (PiCr) a través de un análisis de sensibilidad.....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participación de la avicultura en la producción pecuaria en México (UNA, 2009).....	6
Figura 2. Evolución de la producción nacional de huevo (UNA, 2009). ....	7
Figura 3. Consumo per cápita de huevo en México (UNA, 2009).....	8
Figura 4. Mecanismo propuesto para la activación de los receptores de insulina por la cinasa activa en respuesta a la cromodulina. Receptores de insulina (IR), Insulina (I) y Cr-transferrina (Cr-Tf) (Vincent, 2000).....	14
Figura 5. Porcentaje de postura (PPOST) de gallinas suplementadas con cromo y cobre en la dieta, que muestra la interacción de ambos minerales.....	40
Figura 6. Masa diaria de huevo (MDH) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo y cobre en la dieta, que muestra la interacción de ambos minerales.....	40
Figura 7. Conversión alimenticia (CA) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo y cobre, que muestra la interacción de ambos minerales. ....	41
Figura 8. Consumo diario de alimento (CONSUMO $g a^{-1} d^{-1}$ ) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta. ....	43
Figura 9. Masa diaria de huevo (MDH) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta.....	44
Figura 10. Conversión alimenticia (CA) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta.....	44
Figura 11. Peso del huevo (PH) en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta. ....	48
Figura 12. Grosor de cascarón (GC) en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en dieta de gallinas en postura. ....	48
Figura 13. Peso de huevo (PH) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta.....	50

Figura 14. Grosor de cascarón (GC) del huevo de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta..... 50

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, por acompañarme a cada instante de la vida, por darme fe, salud y motivación para seguir adelante cada día de mi vida.

A mi muy querida *Alma Mater*, la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Producción Animal por darme la oportunidad y el apoyo para culminar una meta más en mi vida.

Al Ph.D. Mariano J. González Alcorta, por brindarme la oportunidad de colaborar con él, pero sobre todo, por sus sabios consejos y por el tiempo y apoyo incondicional que me brindó durante mis estudios de posgrado. Al Dr. Mariano y su familia, muchas gracias por su apoyo en los momentos difíciles.

Al Ph.D. Maximino Huerta Bravo, por su apoyo y sugerencias para el enriquecimiento de este trabajo de investigación y por todos sus conocimientos y experiencias compartidas durante mis estudios.

A los Doctores, Juan Manuel Cuca García, Silvia Carrillo Domínguez y Rafael Núñez Domínguez, por sus valiosas aportaciones para el desarrollo y finalización de este trabajo de investigación.

A todos mis compañeros y amigos que no necesito nombrar, con quienes compartí parte de mi vida y experiencias durante estos dos años en las instalaciones del Posgrado en Producción Animal.

Al CONACYT por la beca otorgada para el desarrollo de mis estudios de Maestría y al Colegio de Posgraduados Campus Montecillos por la facilidad prestada para el desarrollo de la fase experimental de esta investigación.

## DATOS BIOGRÁFICOS

### Datos personales

Nombre	Jorge Adán Hernández Arguello
Fecha de nacimiento	19 de julio de 1981
Lugar de nacimiento	Villaflores, Chiapas
CURP	HEAJ810719HCSR01
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia
Cédula profesional	5724635



### Desarrollo académico

1996-1999	Preparatoria Agrícola Universidad Autónoma Chapingo
1999-2004	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia Departamento de Zootecnia Universidad Autónoma Chapingo
2008-2009	Maestro en Ciencias en Innovación Ganadera Posgrado en Producción Animal Departamento de Zootecnia Universidad Autónoma Chapingo

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En la industria avícola de México, el sorgo y la pasta soya son las principales materias primas utilizadas en la elaboración de alimentos balanceados y en conjunto suman al menos 80% del total de la dieta. El encarecimiento de los granos, especialmente el ocurrido en el periodo enero de 2006 a enero de 2009 en el que tanto, el sorgo y la soya aumentaran sus precios 66 y 108% respectivamente, impacta de manera negativa en los costos de producción de todas las áreas de la ganadería (Coordinación General de Ganadería, 2009). Ante esta situación, es importante contar con alternativas que permitan que las aves hagan un uso eficiente de los granos y de los nutrimentos presentes en la dieta, beneficiando por tanto a los productores ante la problemática de escasez y encarecimiento de los granos.

Actualmente las enfermedades cardiovasculares constituyen la principal causa de mortalidad en México. La hipercolesterolemia en conjunto con la hiperlipidemia aumenta significativamente la probabilidad de presentar enfermedades cardiovasculares, presentándose la mayor prevalencia en los estratos socioeconómicos medio y alto. Martínez-Hernández y Chávez-Aguirre (2007) indican que en México 35% de la población presenta hipercolesterolemia y en el caso del Estado de México este valor es 46%, presentándose una variación de estos niveles en función de la zona geográfica y del sexo de las personas.

La yema de huevo tiene un alto contenido de triglicéridos, fosfolípidos, ácidos grasos y colesterol (Oba *et al.*, 2005). Aunque algunos estudios revelan que el consumo de alimentos con alto contenido de colesterol, como el huevo, no tienen efecto alguno sobre los niveles de colesterol en sangre (Hu *et al.*, 1999; Nakamura *et al.*, 2006); otros sugieren que tal relación si existe (Tzonou *et al.*,

1993). En vista de la controversia que aún persiste sobre este tema, muchas personas reducen o eliminan por completo el consumo de huevo, pues lo consideran un factor de riesgo para desarrollar enfermedades cardiovasculares (ECV) por su elevado contenido de colesterol. Sin embargo, esta decisión puede ocasionar más perjuicios que beneficios, porque el huevo es una importante fuente de nutrimentos para las personas (Carrillo, 2005), además México ocupa el primer lugar en el mundo como consumidor de huevo fresco (UNA, 2009); esto plantea la oportunidad de utilizar al huevo como un vehículo para hacer llegar a la población estos nutrimentos y otros compuestos nutraceuticos presentes en el huevo.

Para incentivar el consumo de huevo, diversas investigaciones se han enfocado a la tarea de reducir el contenido de colesterol en el huevo. El uso de microminerales como cromo y cobre en la dieta de gallinas en postura, pueden modificar el perfil lipídico y reducir el nivel de colesterol del huevo, además de mejorar los parámetros productivos y la calidad del huevo (Debski *et al.*, 1998; Uyanik *et al.*, 2002; Lien *et al.*, 2004).

Para el caso de México no existe información disponible que indique cuáles son los niveles de suplementación con cromo y cobre en dietas para gallinas en postura que optimicen los parámetros productivos y la calidad física del huevo, y que además modifiquen el perfil lipídico o reduzcan el contenido de colesterol del huevo, por lo que en esta investigación se presenta información que vincula directamente una innovación tecnológica con la industria del huevo y la población mexicana.

En esta investigación se realizó un estudio que tuvo como objetivos evaluar la respuesta a la suplementación de cromo y cobre en las variables productivas: porcentaje de postura, consumo diario de alimento, masa diaria de huevo, y conversión alimenticia de gallinas en postura. También se presenta información referente al efecto de la suplementación de estos minerales en las variables de calidad física que incluyen: peso de huevo, altura de la albúmina, Unidades Haugh, color de yema, y grosor de cascarón.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Marco contextual

#### 2.1.1 El huevo y las enfermedades cardiovasculares

Algunas investigaciones clínicas en humanos demuestran que la cantidad de ácidos grasos saturados y colesterol contenidos en la dieta consumida, tienen una asociación positiva con las concentraciones de colesterol en sangre (Tzonou *et al.*, 1993) y con los problemas de arteriosclerosis (engrosamiento y endurecimiento de arterias), que predisponen a las personas a contraer enfermedades cardiovasculares (ECV). De tal forma que el consumo total de grasas, así como la composición de ácidos grasos en la dieta, juegan un papel importante en el desarrollo de ECV y otros problemas de salud como, obesidad y diabetes tipo 2 (Anderson *et al.*, 2002).

El consumo de grasas saturadas favorece la síntesis de lipoproteínas de baja densidad (LDL) y eleva los niveles de colesterol sérico, dando lugar a una hipercolesterolemia. Mientras que el colesterol unido a lipoproteínas de alta densidad (LHD) tienen una relación inversa con el riesgo de presentar ECV (Carrillo, 2005; Lahoz y Mostaza, 2007; O'Donnell y Elousa, 2008).

En vista de ello, desde hace algunos años, muchas personas reducen o eliminan por completo el consumo de huevo, debido a que por su contenido de colesterol, lo consideran un factor de riesgo para desarrollar enfermedades cardiovasculares, sin embargo, esta percepción es errónea, ya que el contenido de colesterol del huevo no tienen efecto sobre los niveles de colesterol en sangre (Hu *et al.*, 1999; Nakamura *et al.*, 2006).

### 2.1.2 Importancia del huevo en la nutrición humana

Los productos avícolas se caracterizan por ser fuentes de proteína de origen animal de alto valor nutritivo, bajo costo y versátiles en su preparación, que los hace accesibles a todos los sectores sociales del país. Hoy se sabe y se reconoce que restringir el consumo de este alimento en la dieta puede ocasionar más problemas que beneficios, ya que el huevo es una importante fuente de nutrimentos (carbohidratos, proteínas, ácidos grasos, aminoácidos, vitaminas, minerales, luteína y zeaxantina) y compuestos nutraceuticos (Stadelman, 1999; Carrillo, 2005).

La porción lípidica del huevo de gallina está constituida por ácidos grasos saturados e insaturados, lípidos y colesterol (Cuadro 1). En el perfil de ácidos grasos predominan el palmítico (C16:0), el esteárico (C18:0), el oleico (C18:1 n9) y el linoleico (C18:2 n6) (Cuadro 2) localizados principalmente en la yema en la forma de lipoproteínas (Carrillo. 2005).

Cuadro 1. Composición de grasas y contenido de colesterol<sup>z</sup> en el huevo fresco.

Componente químico	Por 100 g de huevo fresco
Grasa total, g	6.2
Ácidos grasos saturados, g	1.8
Ácidos grasos monoinsaturados, g	2.4
Ácidos grasos poliinsaturados, g	0.9
Ácidos grasos insaturados trans, g	0.1
Otros lípidos, g	1.0
<sup>z</sup> Colesterol, mg	193.5

Fuente: Adaptado de Carrillo (2005). <sup>z</sup> Promedio del contenido de colesterol por yema de huevo obtenido de: Pesti y Bakalli (1998), Stadelman (1999), e Idowu *et al.* (2006).

Cuadro 2. Perfil de ácidos grasos del huevo de gallina.

Ácido graso	Formula condensada	g/100 TAG <sup>z</sup>
<i>Saturados</i>		
Mirístico	C14:0	0.26
Palmítico	C16:0	23.15
Heptadecanoico	C17:0	0.19
Esteárico	C18:0	8.73
Araquídico	C20:0	0.03
Lignocérico	C24:0	0.22
<i>Monoinsaturados</i>		
Pentadecanoico	C15:1	0.07
Palmitoleico	C16:1	1.89
Cis 10-heptadecanoico	C17:1	0.11
Oleico	C18:1 n-9	39.10
Gadoleico o Gondoico	C20:1	0.21
<i>Poliinsaturados</i>		
Linoleico	C18:2 n-6	18.80
Alfa-linoleico	C18:3 n-3	1.21
Araquidónico	C20:4 n-6	3.01
Eicosapentaenoico	C20:5 n-3	0.03
Docosahexaenoico	C22:6 n-3	2.18

<sup>z</sup>Total de ácidos grasos; Fuente: Carrillo *et al.*, (2008)

Es importante mencionar que en promedio un huevo pesa aproximadamente 60 g, de los cuales 18 a 19.8 g corresponden a la yema (30-33%), 36 g corresponden a la albúmina (60%) y el cascarón representa de 5.4 a 7.2 g (9-12%) (Roberts, 2004).

### 2.1.3 Producción actual de huevo en México

El sector avícola participa con más de 60% (Figura 1) de la producción pecuaria en el país. De ésta cifra, 35.1% lo aporta la producción de pollo, 28.3% el huevo y 0.2% el pavo, lo que permite que muchas personas en el país incluyan en su dieta algún producto avícola (UNA, 2009).

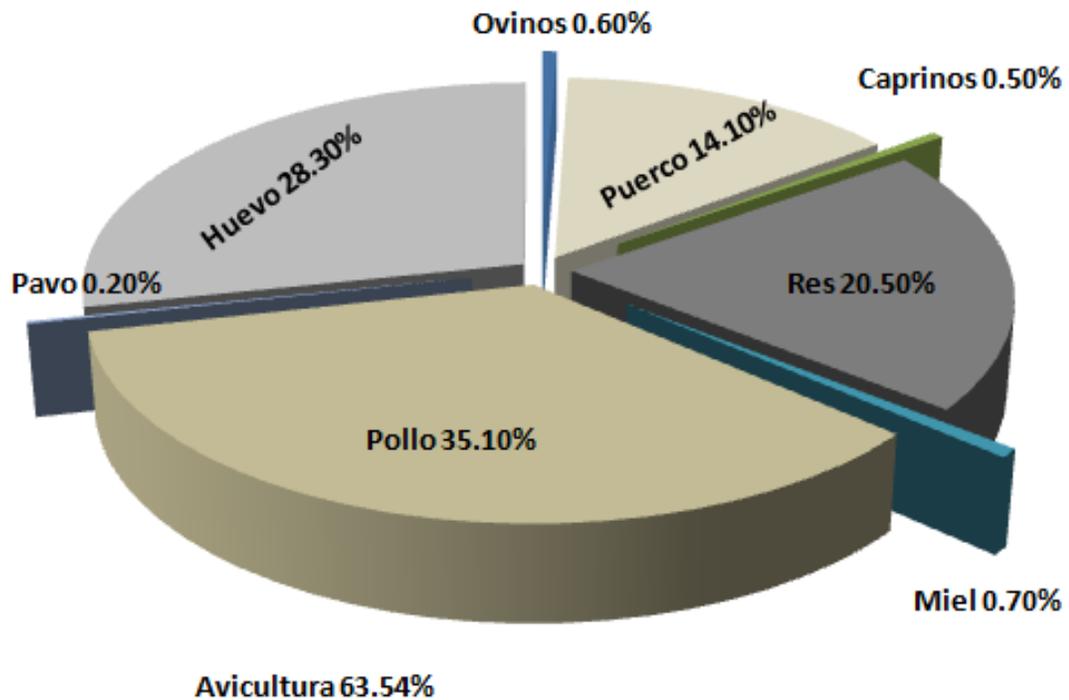


Figura 1. Participación de la avicultura en la producción pecuaria en México (UNA, 2009).

Los producción nacional de huevo se concentra principalmente en los estados de Jalisco, Puebla y Sonora con 75% de la producción, y se ha mantenido en constante crecimiento, de tal forma que en los 14 años recientes (Figura 2) la tasa media de crecimiento anual (TMCA) fue 3.3% con una producción actual de 2.3 millones de toneladas de huevo y se espera que para el año 2009 este ritmo de crecimiento disminuya a 2% (UNA, 2009).

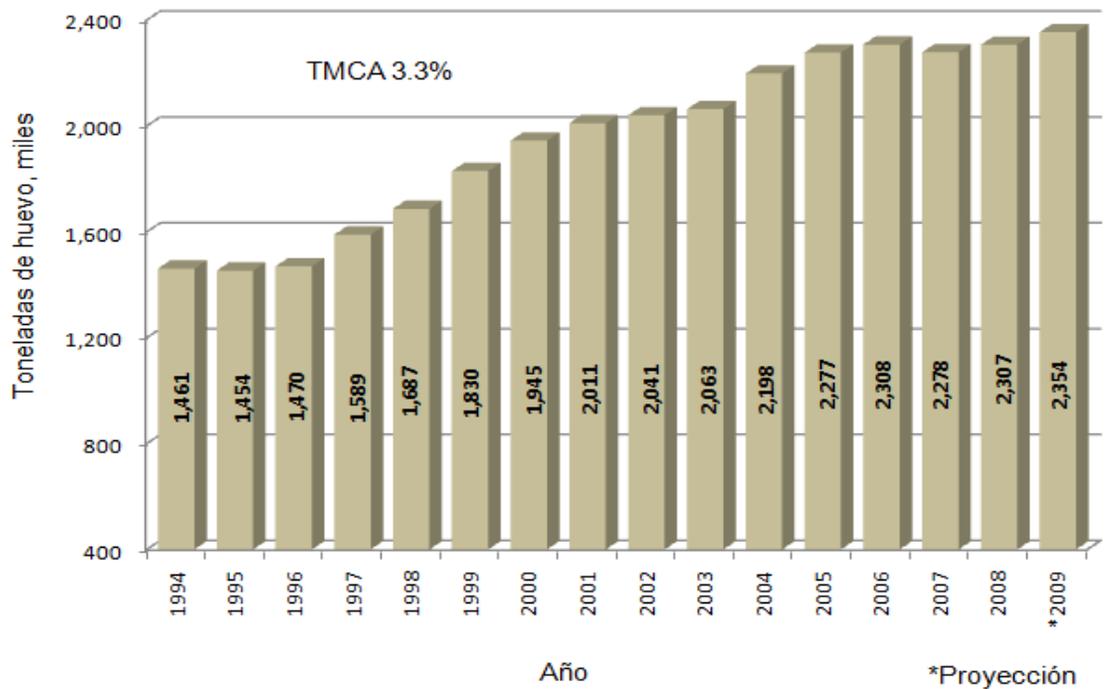


Figura 2. Evolución de la producción nacional de huevo (UNA, 2009).

En México el consumo de huevo por habitante se ha mantenido en crecimiento cada año, con una tasa media de crecimiento anual (TMCA) de 3.3% (Figura 3) en los 14 años pasados. A nivel mundial México ocupa el primer lugar en el consumo de huevo fresco para plato; por ejemplo, en 2008 se consumieron 21.68 kg de huevo por habitante equivalente a 347 piezas al año, para el año 2009 el consumo fue equivalente a 22.2 kg ó 355 piezas y se espera que para el año 2010 este consumo sea equivalente a 22.4 kg ó 358 piezas (UNA, 2009).

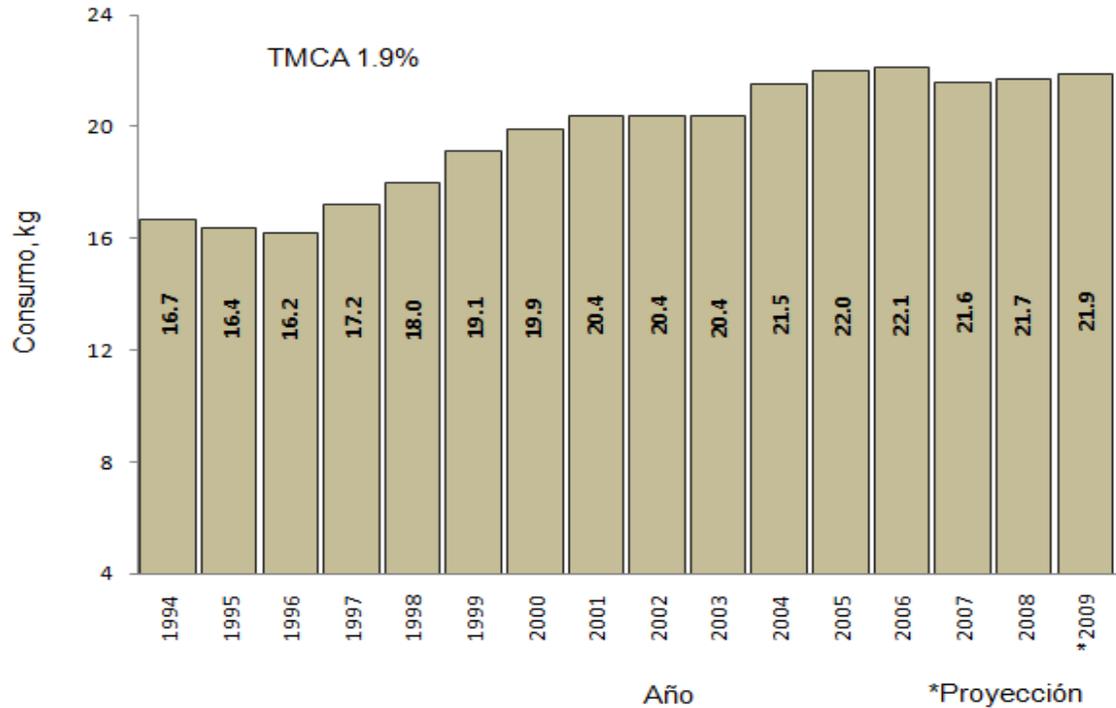


Figura 3. Consumo per cápita de huevo en México (UNA, 2009).

### 2.1.4 Impacto de la investigación

Considerando que el huevo es de los alimentos de mayor consumo en México (350 piezas *per cápita*) por su bajo costo de adquisición, versatilidad en su preparación, cualquier modificación que se pueda hacer en su composición nutrimental, genera una oportunidad para abastecer a los consumidores con un producto de mejor calidad. Por consiguiente, la suplementación de minerales como cromo y cobre, que modifiquen el perfil lipídico o reduzcan el contenido de colesterol total en huevo, representa una oportunidad para hacer llegar a la población mexicana productos de alto valor nutrimental que beneficien su salud. Además, se espera que a través de la suplementación con cromo y cobre los parámetros productivos como masa diaria de huevo, conversión alimenticia y calidad física del huevo se mejoren, lo que permitirá a los productores avícolas incrementar sus niveles de producción a la par de obtener un producto diferenciado con un valor agregado, que en conjunto puede mejorar los ingresos en sus explotaciones.

## **2.2 Marco conceptual**

### **2.2.1 Importancia de los minerales en la nutrición avícola**

Los minerales son la parte inorgánica de los alimentos y tejidos, y son requeridos para la formación y mantenimiento del esqueleto, son parte de varios compuestos con funciones particulares en el organismo, actúan como activadores de sistemas enzimáticos o como cofactores de enzimas y en el mantenimiento del balance osmótico en el cuerpo de las aves. Se encuentran divididos en dos categorías (macrominerales y microminerales) de acuerdo a la cantidad requerida en la dieta. Los requerimientos de los macrominerales generalmente se expresan como porcentaje en la dieta, mientras que los requerimientos de los microminerales se expresan en miligramos por kilogramo de dieta (NRC, 1994; Pond *et al.*, 2005).

Los macrominerales identificados como necesarios para el adecuado crecimiento de los animales, incluyen al calcio (Ca), fósforo (P), sodio (Na), cloro (Cl), potasio (K), magnesio (Mg) y azufre (S) (Pond *et al.*, 2005), mientras que los microminerales o elementos trazas incluyen al cobre (Cu), yodo (I), hierro (Fe), manganeso (Mn), selenio (Se) y zinc (Zn). El cobalto también se requiere, pero no necesariamente tiene que ser suplementado como un elemento traza porque es parte de la vitamina B<sub>12</sub> (NRC, 1994; Pond *et al.*, 2005). Además de estos elementos minerales, existen otros microminerales considerados como indispensables, tal es el caso del boro (B), molibdeno (Mo), silicio (Si), cromo (Cr) (Pond *et al.*, 2005) y otros más que basados en pruebas limitadas en diferentes especies animales posiblemente sean requeridos como el aluminio (Al), arsénico (As), cadmio (Cd), níquel (Ni), vanadio (V), estaño (Sn), bromo (Br), plomo (Pb) y litio (Li) (McDowell y Arthington, 2005; Pond *et al.*, 2005).

## 2.3 Cromo

### 2.3.1 Propiedades químicas

El cromo (Cr) es un elemento mineral con masa atómica de 51.996 g, ocupa el lugar número 21 como elemento más abundante en la corteza terrestre, teóricamente se puede encontrar en los estados de oxidación de -2 a +6, encontrándose a menudo en los estados de oxidación de 0, +2, +3 y +6 (Pechova y Pavlata, 2007), pero de forma natural se encuentra principalmente en dos estados naturales que son cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) y cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) (Debasis *et al.*, 2002).

El Cr elemental ( $\text{Cr}^0$ ), no se encuentra presente de manera natural en la corteza terrestre y es biológicamente inerte. El cromo divalente ( $\text{Cr}^{2+}$ ) es altamente reductivo y se oxida rápidamente al entrar en contacto con el aire formando  $\text{Cr}^{3+}$ , lo cual explica porque el  $\text{Cr}^{2+}$  no se encuentra disponible en los sistemas biológicos (Pechova y Pavlata, 2007).

El cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) es el estado de oxidación más estable, siendo la forma que se encuentra en los organismos vivos (Pechova y Pavlata, 2007). Algunas formas de  $\text{Cr}^{3+}$  como el óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) a menudo son usados como marcadores en los estudios de digestibilidad debido a su baja reactividad y absorción en el aparato digestivo, y debido a su baja capacidad de atravesar membranas celulares (Clawson *et al.*, 1955; Leigh *et al.*, 1997); además de su baja reactividad que es el rasgo principal que lo diferencia del  $\text{Cr}^{6+}$  (Mertz, 1992).

El Cr hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) es el segundo estado de oxidación más estable, siendo altamente oxidante en medios ácidos. Es usado en diversas industrias y se considera tóxico, mutágeno y carcinógeno (Debasis *et al.*, 2002). El  $\text{Cr}^{6+}$  que se encuentra unido a oxígeno como cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) o dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) tienen alta capacidad oxidativa, pudiendo atravesar membranas biológicas fácilmente, reaccionando con proteínas y ácidos nucleicos dentro de las células iniciándose

una deoxidación a  $\text{Cr}^{3+}$ . La reacción con material genético le provee propiedad carcinogénica, sin embargo, los mecanismos citotóxicos aún no están bien entendidos, pero existen numerosos estudios que han demostrado que el  $\text{Cr}^{6+}$  induce estrés oxidativo, daños a nivel de ADN, muerte celular programada y alteración en la expresión de genes (Debasis *et al.*, 2002; Pechova y Pavlata, 2007).

La prueba de que el Cr podría ser esencial para los animales se dio a conocer en 1954 cuando se demostró que incrementaba la síntesis de colesterol y ácidos grasos en el hígado de ratas. Desde entonces se ha demostrado que el  $\text{Cr}^{3+}$  afecta las concentraciones de glucosa, lípidos, microminerales en los tejidos (Anderson, 1997) y es esencial como cofactor para el funcionamiento de la insulina, además de ser requerido para el metabolismo normal de proteínas, grasas, lípidos y carbohidratos (Vincent, 2001; Debasis *et al.*, 2002; Pond *et al.*, 2005; Komorowski *et al.*, 2008).

### **2.3.2 Funciones**

El  $\text{Cr}^{3+}$  es necesario para la activación de ciertas enzimas, como la tirosina cinasa y para la estabilización de proteínas y ácidos nucleicos, es un potencializador de la insulina mediante su presencia en una molécula organometálica identificada como un oligopéptido fijador de cromo al que inicialmente llamaron sustancia de bajo peso molecular ligadora de cromo (LMWCr), factor de tolerancia a la glucosa (GTF por sus siglas en inglés) o cromodulina (NAS, 1997; Vincent, 2000; Viera y Davis-McGibony, 2008) que contiene  $\text{Cr}^{3+}$  como ingrediente activo formando un complejo en una proporción de una molécula de  $\text{Cr}^{3+}$ , dos de ácido nicotínico, dos glicinas, una de cisteína y una de ácido glutámico aproximadamente (Schwartz y Mertz 1959; Vincent 2001). Existe evidencia que sugiere que la suplementación con picolinato de cromo (CrPic) induce una respuesta hipoglicémica o que mejora la eficiencia de la insulina en cerdos (Steele *et al.*, 1977; Page *et al.*, 1993; Matthews *et al.*, 2001), mientras que para el caso de pollos y aves de corral la suplementación *in vivo* e *in vitro* con fuentes inorgánicas de  $\text{Cr}^{3+}$  como cloruro de cromo ( $\text{CrCl}_3$ )

alteran el metabolismo y la tasa de utilización de la glucosa por el hígado y mejora el desempeño productivo de pollos jóvenes (Steele y Rosebrough, 1981; Cupo y Donaldson, 1987), fuentes como CrPic reducen la mortalidad (Kim *et al.*, 1996), mientras que el uso de cromo en levadura reduce el contenido de colesterol en plasma, musculo (Al-Mashhadani *et al.*, 2010) y yema de huevo (Cheng y Hsu, 1997; Lien *et al.*, 2004), además de alterar el metabolismo de la glucosa en pollos. Otras investigaciones con aves indican que la suplementación dietética de Cr<sup>3+</sup> puede utilizarse para aliviar problemas de intoxicación con vanadio (V) en pollos de engorda y gallinas de postura (NAS, 1997). Estudios con ratas de laboratorio obesas, determinaron que suplementar Cr<sup>3+</sup> mejora el uso de la glucosa, disminuye el nivel de colesterol total en plasma y aumenta los niveles de lipoproteínas de alta densidad (LHD) (Cefalu *et al.*, 2002).

### **2.3.3 Absorción y transporte**

En el caso de ratas de laboratorio el cromo se absorbe principalmente en el intestino delgado, siendo más activa la absorción en el yeyuno en comparación con la del íleon y duodeno. Las formas inorgánicas como CrCl<sub>3</sub> (heptahidratado) y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de cromo) son pobremente absorbidos, estimando su absorción en 0.5%, sin embargo, la eficiencia de absorción está relacionada inversamente a su consumo (NAS, 1997). Se almacena en pequeñas cantidades en los tejidos, concentrándose en hígado, riñones, bazo y huesos, debido principalmente a su rápida excreción por vías urinarias (Cefalu *et al.*, 2002).

Las formas manufacturadas de Cr<sup>6+</sup> son más solubles que las formas de Cr<sup>3+</sup> cuando son administradas directamente en el intestino, siendo absorbidos de tres a cinco veces más rápido que las formas de Cr<sup>3+</sup> (Anderson, 1997). Las sales de Cr<sup>3+</sup> son pobremente absorbidas en el tracto gastrointestinal (Debasis *et al.*, 2002), la razón de esta baja disponibilidad probablemente esté relacionado con la formación de óxido de cromo insoluble, a la unión natural con agentes quelantes como fíatos en los ingredientes usados para alimentación animal, por la interferencia con otros iones de minerales como el zinc, hierro y

vanadio y por la baja o nula conversión del cromo inorgánico a la forma bioactiva (Ranhotra y Gelroth, 1986).

Una vez absorbido el Cr circula en plasma en concentraciones de 0.01 a 0.3  $\mu\text{g L}^{-1}$  (Anderson, 1997) asociado con la porción  $\beta$ -globulina del plasma y en concentraciones fisiológicas es transportado a los tejidos unido a la transferrina posiblemente como un componente del factor de tolerancia a la glucosa (NAS, 1997).

El efecto más importante de la cromodulina o GFT es su efecto para potencializar los efectos de la insulina para la conversión de glucosa o lípidos en dióxido de carbono por los adipocitos. Los mecanismos propuestos por los cuales la cromodulina activa la insulina mediante la cinasa activa (Figura 4), se explica de la siguiente manera: la forma inactiva de los receptores de insulina (IR) es convertida a la forma activa cuando se une a insulina activando el movimiento del Cr en forma de transferrina de cromo (Cr-Tf) de la sangre al interior de las células dependientes de insulina, fijándose el cromo para formar la apocromodulina. Finalmente la apocromodulina se fija a los receptores de insulina activando los receptores de la cinasa activa estimulando la actividad de la insulina. Una vez que la concentración de glucosa en sangre se normaliza, la concentración de insulina disminuye y la cromodulina se elimina de la célula, observándose un aumento en las concentraciones de cromo en orina consistente con la pérdida de cromodulina de las células después del consumo de carbohidratos y azúcares (Vincent, 2000; Vincent, 2001).

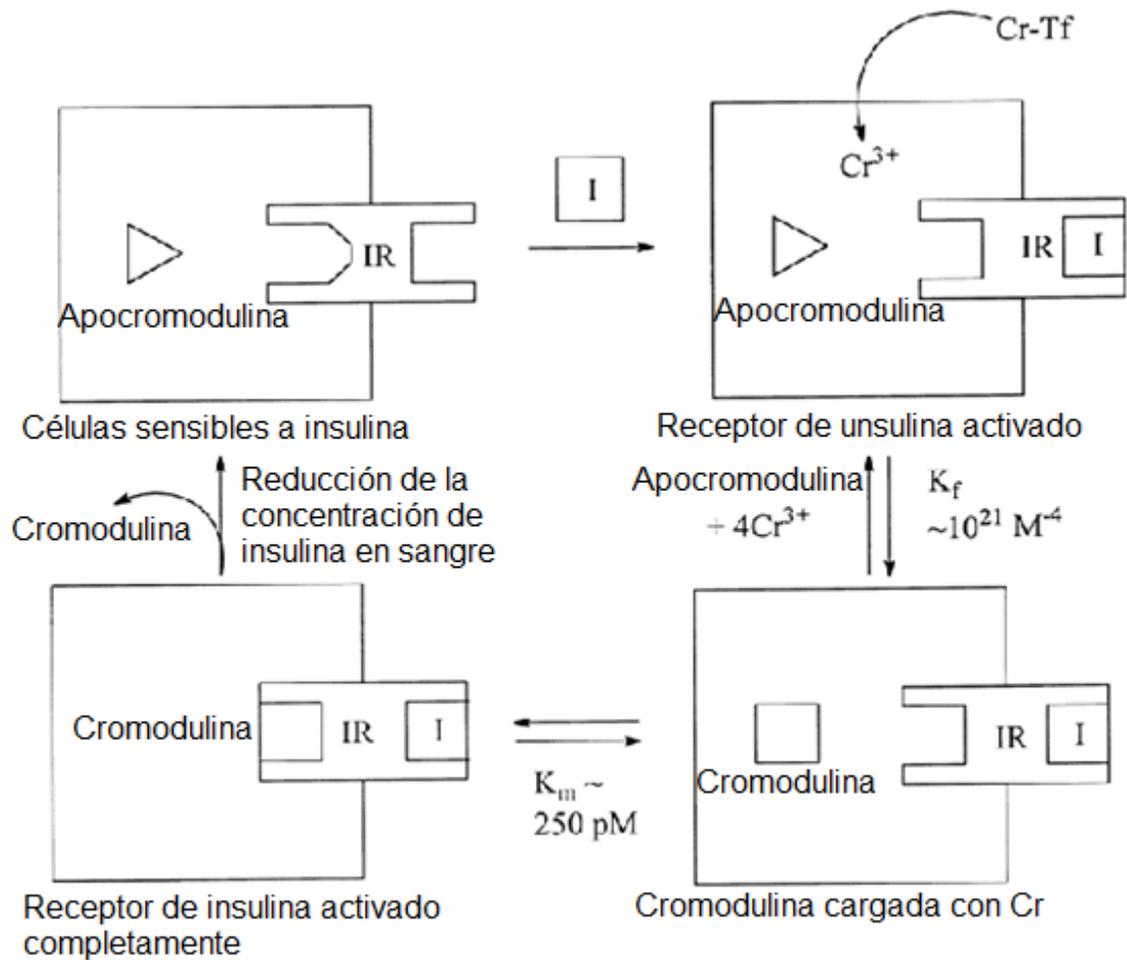


Figura 4. Mecanismo propuesto para la activación de los receptores de insulina por la cinasa activa en respuesta a la cromodulina. Receptores de insulina (IR), Insulina (I) y Cr-transferrina (Cr-Tf) (Vincent, 2000).

#### 2.3.4 Signos de deficiencia

Basado en evidencias limitadas y resultados poco consistentes de los efectos de la suplementación de cromo en el metabolismo, salud y producción de los animales, NAS (1997) sugiere que el cromo puede ser un mineral esencial y reporta signos y síntomas de su deficiencia (Cuadro 3). Sin embargo, EFSA (2009) informa que bajo condiciones experimentales o en producción no se han demostrado síntomas de su deficiencia, por lo que no existen evidencias de su esencialidad como elemento traza en la nutrición animal y en consecuencia no

se pueden establecer los requerimientos diarios de cromo para animales en producción o son difíciles de definir (NAS, 1997; EFSA, 2009).

Cuadro 3. Signos y síntomas de deficiencia de cromo.

Función	Especie
Intolerancia a la glucosa	Humanos, ratas, ratones, ardillas, monos y cerdos de guinea
Circulación elevada de insulina	Humanos, ratas y cerdos
Glicosuria	Humanos y ratas
Reducción en la tasa de crecimiento	Humanos, ratas, ratones y pavos
Hipoglicemia	Humanos
Colesterol y triacilgliceroles elevados en plasma	Humanos, ratas, ratones, vacas y cerdos
Neuropatía	Humanos
Encefalopatía	Humanos
Disminución de la fertilidad y bajo conteo espermático	Ratas
Disminución de la longevidad	Ratas y ratones
Disminución de receptores de insulina	Humanos
Disminución de la masa corporal magra	Humanos, cerdos y ratas
Elevado porcentaje de grasa corporal	Humanos y cerdos

Fuente: Adaptado de NAS (1997)

## 2.4 Cobre

### 2.4.1 Propiedades químicas

El cobre es un metal rojizo que se encuentra de manera natural en las rocas, suelo, agua, sedimentos y en el aire. En la naturaleza, el cobre se encuentra principalmente en tres estados de oxidación, como metal ( $\text{Cu}^0$ ), ion cuproso

(Cu<sup>1+</sup>) e ion cúprico (Cu<sup>2+</sup>), aunque se conoce un tercer estado de oxidación (Cu<sup>3+</sup>), el cual es muy inestable y su importancia biológica es cuestionable. De forma natural, el cobre se puede encontrar en forma de calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), cuprita (Cu<sub>2</sub>O) y malaquita (Cu<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)(OH)<sub>2</sub>), y como mineral en forma de sulfuros, óxidos y carbonatos. (NAS, 2000; ATSDR, 2004).

El ion cúprico (Cu<sup>1+</sup>) se disocia rápidamente en medios acuosos para formar ion cuproso (Cu<sup>2+</sup>) y Cu<sup>0</sup>. Los compuestos de cobre (Cu<sup>1+</sup>) que son estables en el agua son insolubles como es el caso del CuCl. El ion cúprico (Cu<sup>2+</sup>) es el estado de oxidación más importante del cobre encontrándose generalmente en el agua, siendo esta forma en la que se une a los compuestos orgánicos e inorgánicos en el ambiente. El Cu<sup>3+</sup> es fuertemente oxidante y se encuentra solo en muy pocos compuestos, siendo de poca importancia ambiental e industrial. El cobre se usa en muchos productos, ya sea para ayudar al crecimiento de microorganismos, como fungicida, en fertilizantes y como suplemento nutricional para humanos y animales, por ser esencial para el crecimiento, integridad cardiovascular, neurovascularización, función endocrina, metabolismo del hierro, y para la formación y transporte de la hemoglobina (NAS, 2000; ATSDR, 2004; Banks *et al.*, 2004), es componente de numerosas enzimas como: citocromo oxidasa, lisil oxidasa, superóxido dismutasa, tirosinasa, ceruloplasmina y dopamina β – monooxigenasa (Linder, 2002; NAS, 2000; Karaman *et al.*, 2009).

#### **2.4.2 Funciones**

El Cu es necesario para la actividad de enzimas relacionadas con el Fe, la formación de elastina y colágeno, la producción de melanina y la integridad del sistema nervioso central (Pond *et al.*, 2005; McDowell y Arthington, 2005). Se necesita para la formación normal de eritrocitos (hematopoyesis) porque permite la absorción normal del Fe en el conducto gastrointestinal, proceso en el que se requiere la oxidación del Fe de su estado ferroso al estado férrico para su transferencia de los tejidos al plasma, proceso en que está involucrada la enzima ceruloplasmina que requiere Cu para esta oxidación. De igual forma,

el Cu participa en la formación normal del hueso ya que promueve la integridad estructural del colágeno del hueso y para la formación normal de elastina en la aorta y el resto del aparato cardiovascular. En este proceso se requiere la presencia de Cu en la lisil oxidasa, enzima necesaria para la eliminación del grupo  $\epsilon$ -amino de la lisina en la formación normal de la desmosina y la isodesmosina, que son grupos de enlace transversal esenciales en la elastina. También se requiere Cu para la mielinización normal de las células del cerebro y la médula espinal como componente de la enzima citocromo oxidasa que es esencial para la formación de la mielina. Numerosas enzimas como la lisil oxidasa, citocromo *c* oxidasa, ferroxidasa y la tirosinasa dependen del Cu (Pond *et al.*, 2005) y otras metaloenzimas importantes como la ceruloplasmina, citocromo oxidasa, lisil oxidasa, superóxido dismutasa, dopamina- $\beta$ -hidroxilasa y tirosinasa (McDowell y Arthington, 2005). El Cu se necesita para la pigmentación normal del pelo y lana, probablemente como componente de las polifeniloxidasas que catalizan la conversión de tirosina en melanina, y para que se incorporen grupos bisulfuro a la queratina del pelo y la lana (Pond *et al.*, 2005).

### **2.4.3 Absorción y transporte**

El lugar de absorción del Cu en el aparato digestivo varía entre las diversas especies (Church *et al.*, 2004), existiendo diferencias en su metabolismo entre animales no rumiantes y rumiantes (Linder, 2002). En monogástricos, la absorción del Cu comienza en el estómago en el caso de cerdos, y en el buche en el caso de las aves; el ambiente ácido disocia al Cu de la materia orgánica permitiendo que pequeñas cantidades se difundan a través de las paredes del mismo. Sin embargo, la mayor proporción de Cu se absorbe en el intestino delgado, principalmente en duodeno e ileon (Linder, 2002).

La absorción en el tracto gastrointestinal se da en forma de cobre iónico o como cobre unido a aminoácidos, cuenta con dos componentes principales: por un lado el transporte activo que es saturable y mediado por metalotioneínas (se relaciona con concentraciones bajas de cobre), y por otro, la difusión simple,

que es un mecanismo pasivo e insaturable (relacionado con concentraciones altas de mineral) (ATSDR, 2004).

Numerosos factores pueden afectar la absorción del cobre, estos factores incluyen la cantidad de cobre en la dieta, competencia con otros minerales (zinc, hierro y cadmio) y la edad. La absorción del cobre parece estar inversamente relacionada con la cantidad del mismo en el tracto gastrointestinal (ATSDR, 2004). La presencia de molibdeno y azufre en la dieta afecta la absorción del cobre debido a la formación de complejos de tiomolibdatos, formando compuestos de cobre complejos reduciendo la disponibilidad del cobre llevándolo a una absorción menor del 1% (Suttle, 1991).

En la mayoría de las especies, el Cu se almacena en hígado, cerebro, riñones, corazón, en la porción pigmentada del ojo y el pelo o lana en concentraciones altas, mientras que en el páncreas, bazo, músculos, piel y hueso se encuentra en cantidades intermedias y en la tiroides, hipófisis, próstata y timo contienen cantidades más bajas. La concentración de Cu en los tejidos es muy variable dentro y entre las especies. El 90% del Cu en la sangre se encuentra combinado con la alfa 2-globulina, ceruloplasmina y el 10% se encuentra en los eritrocitos en forma de eritrocupreína (Pond *et al.*, 2005).

#### **2.4.4 Signos de deficiencia**

La deficiencia de Cu dietético se relaciona con la disminución gradual de las concentraciones tisulares y sanguíneas de Cu. La deficiencia de Cu acorta el tiempo de vida de los eritrocitos y reduce la eficiencia de absorción y utilización del Fe, de esta manera una deficiencia de Cu se relaciona con una anemia de tipo monocromica en el caso de pollos; también resulta en huesos anormales en muchas especies como cerdos y pollos, lo cual se debe a una falta de mineralización de la matriz cartilaginosa del hueso. Este defecto al parecer está relacionado con un cambio en los enlaces transversales del colágeno que lo hace más soluble que el colágeno de los huesos normales. En pollos, cerdos y bovinos con deficiencia de Cu se presentan lesiones y hemorragias

cardiovasculares como resultado de la ruptura de la aorta en respuesta a la deficiencia de Cu. En el caso de aves de corral, la deficiencia de Cu produce una reducción en la producción de huevo, hemorragias y muerte, y problemas de tipo reproductivo como consecuencia de lesiones primarias en la formación de eritrocitos y tejido conectivo en el embrión, inducido posiblemente por una reducción en la actividad de la lisil oxidasa (Pond *et al.*, 2005).

#### **2.4.5 Comportamiento productivo en respuesta a la suplementación de cromo y cobre**

Cheng y Hsu (1997), encontraron que al usar diferentes fuentes de cromo orgánico en niveles de 200  $\mu\text{g}$  de Cr  $\text{kg}^{-1}$  de dieta, que la concentración de colesterol en la yema disminuye sin afectar la producción de huevo. Resultados similares fueron obtenidos por Debski *et al.*, (1998) usando 500  $\mu\text{g}$  de Cr  $\text{kg}^{-1}$  (levadura de cromo) quienes encontraron una reducción en los niveles de colesterol total, fosfolípidos y triglicéridos en la yema de huevo además de aumentar el peso de huevo y yema. Uyanik *et al.*, (2002) usando 20000  $\mu\text{g}$  de Cr  $\text{kg}^{-1}$  de una fuente inorgánica de cromo (cloruro de cromo) observaron una disminución en los niveles de colesterol y triglicéridos en plasma así como una reducción en el contenido de colesterol en la yema de huevo sin afectar la calidad del huevo. En trabajos realizados por Lien *et al.*, (2004) sugieren que 125 mg de Cu  $\text{kg}^{-1}$  de dieta en conjunto con 800 a 1600  $\mu\text{g}$  de Cr  $\text{kg}^{-1}$  de dieta son adecuados para reducir el nivel de colesterol en huevo. Aunado a los resultados obtenidos, existen inconsistencias en los niveles de suplementación, tal como menciona el NAS (1997) en un trabajo de compilación elaborado a partir de diversos artículos científicos, en donde indica que los niveles usados al igual que los resultados obtenidos al suplementar cromo son muy variables.

#### **2.4.6 Calidad física del huevo**

El término “calidad” fue definido por Kramer (1951, citado por Koelkebeck, 1999) como “la suma de características de un alimento en específico, que tiene la capacidad de influir en la aceptabilidad o preferencia del consumidor”. La

calidad del huevo está determinada por las características que se observan y que se pueden medir de manera directa, como tamaño o peso del huevo, gravedad específica, altura de la albúmina, Unidades Haugh, color de la yema y la condición del cascarón medida como grosor, peso, porcentaje, índice de deformación y resistencia a la ruptura (Stadelman, 1999; Roberts, 2004; Kramer 1951 citado por Koelkebeck, 1999). La calidad interna del huevo y la calidad del cascarón son de gran importancia en la industria avícola en todo el mundo, siendo de gran importancia el entendimiento de los factores que afectan su calidad, ya que los problemas relacionados con la mala calidad genera pérdidas por varios millones de dólares al año (Roberts, 2004). Numerosos factores afectan la calidad tanto interna como externa del huevo, como pueden ser: línea genética y edad de las aves, muda, polisacáridos no almidones, enzimas, alimentos contaminados, estrés calórico, enfermedades, vitaminas, calidad del agua, contenido de calcio y fósforo en la dieta, entre otros (Roberts, 2004)

Roland (1988), estimó que las pérdidas de huevo producidas desde el manejo del producto en las granjas hasta el consumidor oscilan entre el 5 y 7% del total de la producción, mientras que Klecker *et al.* (2002) estimaron que estas pérdidas son del orden del 6 al 8%, en ambos casos relacionado principalmente con la mala calcificación del huevo al final del ciclo de producción, que de acuerdo con Al-Batshan *et al.* (1994) se debe a una disminución de 9.8 a 8.9% en el porcentaje de cascarón y 0.403 a 0.373 mm en el grosor del cascarón de las 22 a las 57 semanas de edad.

Mabe *et al.* (2003) reportaron que los minerales traza como Zn, Mn y Cu afectan la calidad del cascarón mediante su participación en reacciones catalíticas de enzimas envueltas en el proceso de formación de las membranas y del cascarón del huevo, e interactúan con cristales de calcio para la formación del cascarón. Baumgartner *et al.* (1978), indicaron que gallinas con deficiencia de cobre producen huevos con cascarones rugosos y ásperos debido a la distribución anormal de las capas mamilares del calcio en el cascarón. El cobre juega un rol integral en la consistencia estructural del cascarón; la lisil oxidasa

es una cuproenzima de crucial importancia en la formación del cascarón (Mabe *et al.*, 2003). De ahí que deficiencias de cobre en gallinas en postura resultan en la formación anormal del huevo (Baumgartner *et al.*, 1978; Chowdhury, 1990).

Paik (2001), reportó que la adición de fuentes orgánicas (proteínatos) de cobre mejoran la calidad del cascarón en un 5% por arriba de los parámetros obtenidos con sulfato de cobre. Idowu *et al.* (2006), reportaron que al incrementar el contenido de cobre en la dieta de 0 a 250 mg Cu kg<sup>-1</sup> de dieta, con sulfato de cobre pentahidratado o proteínato de cobre, las variables relacionadas con la calidad del huevo como peso de huevo y Unidades Haugh se mejoran mientras que el grosor de cascarón no se afecta, encontrando que las mejores respuestas se producen con sulfato de cobre pentahidratado a niveles de 250 mg Cu kg<sup>-1</sup> de dieta.

## 2.5 Literatura citada

- Al-Batshan, H. A., S. E. Scheideler, B. L. Black, J. D. Garlich, and K. E. Anderson. 1994. Duodenal calcium uptake, femur ash, and eggshell quality decline with age and increase following molt. *Poultry Science* 73: 1590-1596.
- Al-Mashhadani, E. H., D.K. Hibrabim, and L. K. Al-Bandr. 2010. Effect of supplementing different levels of chromium yeast to diet on broiler chickens performance. *International Journal of Poultry Science* 9(4): 376-381.
- Anderson, A. C., C. Nalsen, S. Tengblad, and B. Vessby. 2002. Fatty acid composition of skeletal muscle reflects dietary fat composition in humans. *American Journal of Clinical Nutrition* 76: 1222-1229.
- Anderson, R. A. 1997. Chromium as an essential nutrient for humans. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 26: 35-41.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 2004. Toxicological profile for copper. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp132.pdf>. Consultada el 10 de enero de 2009.
- Banks, K. M., K. L. Thompson, J. K. Rush, and T. J. Applegate. 2004. The effects of copper source on phosphorus retention in broiler chicks and laying hens. *Poultry Science* 83: 990-996.
- Baumgartner, S., D. J. Brown, E. Salevsky, and R. M. Leach. 1978. Copper deficiency in the laying hen. *Journal of Nutrition* 108(5): 804-811.
- Carrillo, D. S. 2005. Mitos y realidades sobre el consumo de huevo. *In: Memoria del XXVI Aniversario del Programa de Ganadería*. 9 de septiembre. Estado de México, México. pp: 21-38.
- Carrillo, D. S., E. López, M. M. Casas, E. Ávila, R. M. Castillo, M. E. Carranco, C. Calvo, and F. Prez-Gil. 2008. Potential use of seaweeds in the laying hen ration to improve the quality of n-3 fatty acid enriched eggs. *Journal of Applied Phycology* 20: 721-728.
- Cefalu, W. T., Q. W. Wang, X. H. Zhang, L. C. Baldor, and J. C. Russell. 2002. Oral chromium picolinate improves carbohydrate and lipid metabolism and enhances skeletal muscle Glut-4 translocation in obese, hyperinsulinemic (JCR-LA Corpulent) rats. *The Journal of Nutrition* 132: 1107-1114.
- Cheng, C. Y., and M. Hsu. 1997. Effect of dietary organic chromium on egg yolk cholesterol level. *In: Memoriam of 14<sup>th</sup> Annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry*. May 1997. Lexington K.Y. p. 44.

- Chowdhury, S. D. 1990. Shell membrane system in relation to iathrogen toxicity and copper deficiency. *World's Poultry Science Journal* 46: 153-169.
- Church, D. C., W.G. Pond, y K. R. Pond. 2004. *Fundamentos de Nutrición y Alimentación de Animales*. Ed. Limusa. 3ª ed. México, D.F. pp: 213-216.
- Clawson, A. J., J. T. Reid, B. E. Sheffy, and J. P. Willman. 1955. Use of chromium oxide in digestion studies with swine. *Journal of Animal Science* 14: 700-709.
- Coordinación General de Ganadería. 2009. Situación actual y perspectivas de la producción de carne de porcino en México 2009. <http://www.sagarpa.gob.mx/ganaderia>. Consultada el 7 de noviembre de 2009.
- Cupo, M. A., and W. E. Donaldson. 1987. Chromium and vanadium effects on glucose metabolism and lipid synthesis in the chick. *Poultry Science* 66: 120-126.
- Debasis, B., J. S. Sidney, W. D. Bernard, B. Manashi, and G. P. Harry. 2002. Cytotoxicity and oxidative mechanism of different forms of chromium. *Toxicology* 180: 5-22.
- Debski, B., J. Niemiec, and W. Zalewski. 1998. Chromium supplementation reduces egg cholesterol content. *In: Memoriam of 14<sup>th</sup> Annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry*. April 1998. Lexington K.Y. p. 46.
- EFSA (European Food Safety Authority). 2009. Scientific opinion of the panel on additives and products or substances used in animal feed (FEEDAP) on a request from the European Commission of the safety and efficacy of chromium methionine (Availa® Cr) as feed additive for all species. *The Journal EFSA* 1043: 1-69.
- Hu, F. B., M. J. Sampfer, E. B. Rimm, J. E. Manson., A. Ascherio, G. A. Colditz, B. A. Rosner, D. Spiegelman, F. E. Speizer, F. M. Sacks, C. H. Hennekens, and W. C. Willett. 1999. A prospective study of egg consumption and risk of cardiovascular disease in men and women. *Journal of American Medical Association* 281: 1387-1394.
- Idowu, O. M. O., T. F. Laniyan, O. A. Kuye, V. O. Oladele-Ojo, and D. Eruvbetine. 2006. Effect of copper salts on performance, cholesterol, residues in liver, eggs and excreta of laying hens. *Archivos de Zootecnia* 55(212): 327-338.
- Karaman, M., H. Ozen, K. Ozcan, and M. Tuzcu. 2009. Immunohistochemical demonstration of nitrosative tissue damage in copper induced liver toxicity in Japanese quails. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi* 15(4): 595-600.

- Kim, Y. H., I. K. Han, Y. J. Choi, I. S. Shin, B. J. Chae, and T. H. Kang. 1996. Effects of dietary levels of chromium picolinate on growth performance, carcass quality, and serum traits in broiler chicks. *Asian Australian Journal of Animal Science* 9: 341-347.
- Klecker, D., L. Zeman, P. Jelinek, and A. Bunesova. 2002. Effect of manganese and zinc chelates on the quality of eggs. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendeleianae Brunensis* 50: 59-68.
- Koelkebeck, K. W. 1999. What is egg quality and conserving it. <http://www.traill.uiuc.edu/poultrynet/paperDisplay.cfm?ContentID=522>. Consultado en enero de 2010.
- Komorowski, J. R., D. Greenberg, and V. Juturu. 2008. Chromium picolinate does not produce chromosome damage. *Toxicology in Vitro* 22: 819-826.
- Lahoz, C., y J. M. Mostaza. 2007. La aterosclerosis como enfermedad sistémica. *Revista Española de Cardiología* 60: 184-195.
- Leigh B. C., W. F. Schmidt, J. B. Reeves III, M. M. Polansky, K. Gautschi, and R. A. Anderson. 1997. Characterization and structure by NMR and FTIR spectroscopy, and molecular modeling of chromium (III) picolinate and nicotinate complexes utilized for nutritional supplementation. *Journal of Inorganic Biochemistry* 66: 119-130.
- Lien, T. F., K. L. Chen, C. P. Wu, and J. J. Lu. 2004. Effects of supplemental copper and chromium on the serum and egg traits of laying hens. *British Poultry Science* 4: 535-539.
- Linder, M. C. 2002. Biochemistry and molecular biology of copper in mammals *In: Handbook of Copper Pharmacology and Toxicology*, E. J. Massaro, ed. Totowa, NJ: Humana Press. pp: 3-32.
- Mabe, I., C. Rapp, M. M. Bain, and Y. Nyss. 2003. Supplementation of a corn soybean meal diet with manganese, copper, and zinc from organic or inorganic sources improves eggshell quality in aged laying hens. *Poultry Science* 82: 1903-1913.
- Martínez-Hernández, A. F., y R. Chávez-Aguirre. 2007. Prevalencia y comorbilidad de dislipidemias en el primer nivel de atención. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social* 45: 469-475.
- Matthews, J. O., L. L. Southern, J. M. Fernandez, J. E. Pontif, T. D. Bidner, and R. L. Odgaard. 2001. Effect of chromium picolinate and chromium propionate on glucose and insulin kinetics of growing barrows and on growth and carcass traits of growing-finishing barrows. *Journal of Animal Science* 79: 2172-2178.
- McDowell, L. R., y J. D. Arthington. 2005. *Minerales para Rumiantes en Pastoreo en Regiones Tropicales*. 4ª ed. Universidad de Florida. Gainesville, Florida, USA. 93 p.

- Mertz, W. 1992. Chromium: history and nutritional importance. *Biological Trace Elemental Research* 32: 3-8.
- Nakamura, Y., H. Iso, Y. Kita, H. Ueshima, K. Okada, M. Konishi, M. Inoue, and S. Tsunaga. 2006. Egg consumption, serum total cholesterol concentration and coronary heart disease incidence: Japan Public Health Center-based prospective study. *British Journal of Nutrition* 96: 921-928.
- NAS (National Academy of Sciences). 1997. *The Role of Chromium in Animal Nutrition*. National Academy Press. Washington, D. C. 93 p.
- NAS (National Academy of Sciences). 2000. *Copper in drinking water*. National Academy Press. Washington, D. C. 147 p.
- NRC (National Research Council). 1994. *Nutrient Requirements of Poultry*. 9<sup>th</sup> revised edition. National Academy Press. Washington, D.C. 155 p.
- O'Donnell, C. J., y R. Elosua. 2008. Factores de riesgo cardiovascular. Perspectivas derivadas del Framingham Heart Study. *Revista Española de Cardiología* 61: 299-310.
- Oba, A., S. P. Alves, A. S. H. Borba, L. M. Kodawara, E. A. Norkus, and A. A. Cerqueira. 2005. Production characteristics and cholesterol levels in blood and eggs from laying hens fed with diets supplemented with vegetable ash, copper, chromium and probiotic. *Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias* 100: 205-210.
- Page, T. G., L. L. Southern, T. L. Ward, and D. L. Thompson, Jr. 1993. Effect of chromium picolinate on growth and serum and carcass traits of growing-finishing pigs. *Journal of Animal Science* 71: 565-662.
- Paik, I. 2001. Application of chelated minerals in animal production. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 14: 191-198.
- Pechova, A., and L. Pavlata. 2007. Chromium as an essential nutrient: a review. *Veterinarni Medicina* 1: 1-18.
- Pesti, G. M., and R. I. Bakalli. 1998. Studies on the effect of feeding cupric sulphate pentahydrate to laying hens on egg cholesterol content. *Poultry Science* 77: 1540-1545.
- Pond, W. G., D. D. Church, K. R. Pond, and P. A. Schoknecht. 2005. *Basic Animal Nutrition and Feeding*. 5<sup>a</sup> ed. Program Assistant. 580 p.
- Ranhotra, G. S., and J. A. Gelroth. 1986. Effects of high chromium baker's yeast on glucose tolerance and blood lipids in rats. *Cereal Chemistry* 63: 411-413.
- Roberts, J. R. 2004. Factors affecting egg international quality and eggs shell quality in laying hens. *Journal of Poultry Science* 41: 161-177.
- Roland, D. A. Sr. 1988. Eggshell problems: estimates of incidence and economic impact. *Poultry Science* 67: 1801-1803.

- Schwartz, K., and W. Mertz. 1959. Chromium (III) and the glucose tolerance factor. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 85: 292-295
- Stadelman, W. J. 1999. The incredibly functional egg. *Poultry Science* 78: 807-811.
- Steele, N. C., and R. W. Rosebrough. 1981. Effect of trivalent chromium on hepatic lipogenesis by turkey poults. *Poultry Science* 60: 617-622.
- Steele, N. C., T. G. Althen, and L. T. Frobish. 1977. Biological activity of glucose tolerance factor in swine. *Journal of Animal Science* 45: 1341-1345.
- Suttle, N. F. 1991. The interactions between copper, molybdenum, and sulphur in ruminant nutrition. *Annual Review of Nutrition* 11: 121-140.
- Tzonou, A., A. Kalandidi, A. Trichopoulou, C. Hsieh, N. Toupadaki, W. Willet, and D. Trichopoulos. 1993. Diet and coronary heart disease: a case-control study in Athens, Greece. *Epidemiology Resources Inc.* <http://www.jstor.org/pss/3702805>. Consultada el 3 de octubre de 2009.
- UNA (Unión Nacional de Avicultores). 2009. Indicadores Económicos. [www.una.org.mx](http://www.una.org.mx). Consultada el 07 de noviembre de 2009.
- Uyanik, F., S. Kaya, A. H. Kolsuz, M. Eren, and N. Sahin. 2002. The effect of chromium supplementation on egg production, egg quality and some serum parameters in laying hens. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences* 26: 379-387.
- Viera, M., and C.M. Davis-McGibony. 2008. Isolation and characterization of low-molecular-weight-chromium-binding substance (LMWCr) from chicken liver. *Protein Journal* 27: 371-375.
- Vincent, J. B. 2000. The biochemistry of chromium. *The Journal of Nutrition* 130: 715-718.
- Vincent, J. B. 2001. The bioinorganic chemistry of chromium (III). *Polyedron* 20: 1-26.

### 3. COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y CALIDAD FÍSICA DE HUEVO EN RESPUESTA A LA SUPLEMENTACIÓN DE CROMO Y COBRE

#### 3.1 Resumen

Se evaluó el comportamiento productivo y calidad física del huevo de gallinas suplementadas con Cr y Cu, así como los niveles óptimos biológicos (NOB) y económicos (NOE) de Cr y Cu para optimizar conversión alimenticia y masa de huevo. Se utilizaron 360 gallinas Bovans White de 31 semanas de edad distribuidas al azar en ocho tratamientos con un diseño factorial con cuatro niveles de Cr (0, 1.2, 2.4 y 3.6 mg Cr kg<sup>-1</sup> de dieta) y dos niveles de Cu (0 y 117 mg kg<sup>-1</sup> de dieta). Los datos se analizaron con un modelo estadístico completamente al azar con diseño factorial de tratamientos. Las medias fueron comparadas con la prueba de Tukey. Para calcular los NOB y NOE se utilizaron modelos econométricos que incluyeron modelos de regresión. La comparación del efecto principal de los niveles de Cr, mejoró ( $p \leq 0.05$ ) la conversión alimenticia (1.88<sup>a</sup>, 1.87<sup>ab</sup>, 1.89<sup>a</sup>, 1.85<sup>b</sup>), incrementó la masa de huevo (58.7<sup>ab</sup>, 58.8<sup>ab</sup>, 58.1<sup>b</sup>, 59.1<sup>a</sup>), sin afectar ( $p > 0.05$ ) el consumo de alimento (110.4, 110.2, 109.8, 109.4). La suplementación de Cu mejoró ( $p \leq 0.05$ ) la conversión alimenticia (1.90<sup>a</sup>, 1.85<sup>b</sup>), incrementó ( $p \leq 0.05$ ) la masa de huevo (58.2<sup>a</sup>, 59.1<sup>b</sup>) y redujo ( $p \leq 0.05$ ) el consumo de alimento (110.4<sup>a</sup>, 109.5<sup>b</sup>). La suplementación de Cr aumentó ( $p \leq 0.05$ ) el peso de huevo (60.7<sup>b</sup>, 61.4<sup>ab</sup>, 62.6<sup>a</sup>, 61.2<sup>ab</sup>), Unidades Haugh (77.8<sup>ab</sup>, 78.9<sup>a</sup>, 78.9<sup>a</sup>, 78.9<sup>a</sup>) y grosor de cascarón (355<sup>b</sup>, 364<sup>b</sup>, 360<sup>ab</sup>, 361<sup>ab</sup>). El nivel de Cu mejoró ( $p \leq 0.05$ ) el peso de huevo (61.0<sup>a</sup>, 62.4<sup>b</sup>) y grosor del cascarón (358<sup>a</sup>, 362<sup>b</sup>), sin afectar las Unidades Haugh (77.5, 77.3). La suplementación conjunta de Cr más Cu mejoró en mayor grado todas las variables de calidad evaluadas en comparación a la suplementación de Cr solamente. Los NOB de Cr y Cu para mínimo consumo de alimento, máxima masa de huevo y mínima conversión alimenticia, son idénticos y correspondieron al nivel de 3.6 mg y 117 mg kg<sup>-1</sup> de dieta. El NOE fue sensible al precio de la fuente de cromo y debido a su costo ocasiona que disminuyan las utilidades al productor.

**Palabras clave:** gallinas, cromo, cobre, comportamiento productivo, calidad física del huevo.

## PRODUCTIVE BEHAVIOR AND PHYSICAL EGG QUALITY IN RESPONSE TO CHROMIUM AND COPPER SUPPLEMENTATION

### 3.2 Abstract

The effect of chromium and copper supplementation on performance and egg quality in layer hens was evaluated in this study, as well as the biological and economic optimal levels (BOL and EOL, respectively) to optimize feed conversion and egg mass. 360 Bovans White hens of 31 weeks of age were randomly distributed in eight treatments in a factorial design with four levels of Cr (0, 1.2, 2.4 and 3.6 mg Cr kg<sup>-1</sup> of diet) and two levels of Cu (0 and 117 mg kg<sup>-1</sup> of diet). The averages were compared with Tukey's test. In order to calculate the BOL and EOL, econometric models were used that included regression models. In terms of the main effect of Cr levels, it improved ( $p \leq 0.05$ ) feed conversion (1.88<sup>a</sup>, 1.87<sup>ab</sup>, 1.89<sup>a</sup>, 1.85<sup>b</sup>) and increased egg mass (58.7<sup>ab</sup>, 58.8<sup>ab</sup>, 58.1<sup>b</sup>, 59.1<sup>a</sup>), without affecting ( $p > 0.05$ ) feed intake (110.4, 110.2, 109.8, 109.4). Cu supplementation improved ( $p \leq 0.05$ ) feed conversion (1.90<sup>a</sup>, 1.85<sup>b</sup>), increased ( $p \leq 0.05$ ) egg mass (58.2<sup>a</sup>, 59.1<sup>b</sup>) and decreased ( $p \leq 0.05$ ) feed intake (110.4<sup>a</sup>, 109.5<sup>b</sup>). Cr supplementation increased ( $p \leq 0.05$ ) egg weight (60.7<sup>b</sup>, 61.4<sup>ab</sup>, 62.6<sup>a</sup>, 61.2<sup>ab</sup>), Haugh Units (77.8<sup>ab</sup>, 78.9<sup>a</sup>, 78.9<sup>a</sup>, 78.9<sup>a</sup>) and eggshell thickness (355<sup>b</sup>, 364<sup>b</sup>, 360<sup>ab</sup>, 361<sup>ab</sup>). The Cu level improved ( $p \leq 0.05$ ) the egg weight (61.0<sup>a</sup>, 62.4<sup>b</sup>) and eggshell thickness (358<sup>a</sup>, 362<sup>b</sup>), without affecting the Haugh Units (77.5, 77.3). Cr and Cu supplemented together improved to a greater degree all the evaluated quality traits in comparison to only Cr supplementation. The BOL of Cr and Cu for minimum feed intake, maximum egg mass and minimum feed conversion ratio are identical and corresponded to the level of 3.6 mg and 117 mg kg<sup>-1</sup> of diet. EOL was sensitive to the cost of the chromium source, and, due to its cost, it reduces producer profits.

**Key Words:** Layer hens, chromium, copper, productive behavior, egg quality.

### 3.3 Introducción

En la industria avícola de México, tanto el sorgo como la pasta soya son las principales materias primas utilizadas en la elaboración de alimentos balanceados y en conjunto suman al menos 80% del total de la dieta. En este sentido, el encarecimiento de los granos, especialmente el ocurrido durante el periodo enero de 2006 a enero de 2009 en el que el sorgo y la soya aumentaron sus precios 66 y 108% respectivamente, impacta de manera negativa en los costos de producción (Coordinación General de Ganadería, 2009). Ante esta situación, es importante contar con alternativas que permitan que las aves hagan un uso eficiente de los granos y de los nutrimentos presentes en la dieta, beneficiando por tanto a los productores ante la problemática de escasez y encarecimiento de los granos y pasta de soya. Una alternativa para lograr lo anterior es disminuir la conversión alimenticia o aumentar la masa de huevo por ave a través de la suplementación de minerales como cromo y cobre, tal como reportan Uyanik *et al.* (2002) y Sahin *et al.* (2002) al suplementar cromo en forma de cloruro de cromo y picolinato de cromo respectivamente, o a través de la suplementación de cobre (sulfato de cobre) como reportaron Bakalli *et al.* (1995) y Pesti y Bakalli, (1996).

El cromo es un elemento mineral abundante en la corteza terrestre, que se puede encontrar en forma trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) y hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) principalmente, siendo las formas biológicas de mayor importancia. El  $\text{Cr}^{3+}$  es el estado de oxidación más estable presente en los organismos vivos (Debasis *et al.*, 2002; Pechova y Pavlata, 2007) y es considerado un microelemento esencial para animales y humanos (Króliczewska *et al.*, 2005), requerido para el metabolismo de lípidos, carbohidratos y proteínas (Anderson, 1997) además de ser necesario para la activación de enzimas, estabilización de proteínas, ácidos nucleicos y como potencializador de la insulina mediante su presencia en una molécula organometálica llamada factor de tolerancia a la glucosa (GTF) (NAS, 1997; Vincent, 2000; Viera y Davis-McGibony, 2008). El cobre es un nutrimento esencial con propiedades antimicrobianas que estimula el crecimiento en aves

(Bakalli *et al.*, 1995; Banks *et al.*, 2004; Abaza *et al.*, 2009), mejora la eficiencia alimenticia (Bakalli *et al.*, 1995; Pesti y Bakalli, 1996) y estimula la producción de huevo sin afectar el peso de los mismos (Pesti y Bakalli, 1998; Bañuelos, 2009).

La suplementación con Cr en aves de postura tiene efectos positivos en parámetros productivos y en calidad de huevo. La adición de Cr a la dieta mejora la producción de huevo (Debski *et al.*, 1998), conversión alimenticia (Sahin *et al.*, 2001; Sahin *et al.*, 2002; Sahin *et al.*, 2005), peso de huevo, grosor de cascarón y Unidades Haugh (Sahin *et al.*, 2001; Sahin *et al.*, 2002). La suplementación con 20 mg Cr kg<sup>-1</sup> de dieta reduce 4.28% la conversión alimenticia debido a una reducción de 1.88% en el consumo diario de alimento (Uyanik *et al.*, 2002), aumenta el porcentaje de postura (11.4%), el peso de huevo (1.5%) y el grosor de cascarón (2.3%) (Sahin *et al.*, 2002) sin afectar el color de la yema (Oba *et al.*, 2005). Sin embargo, existen investigaciones que indican que la suplementación con Cr no tiene efectos en la producción y peso de huevo, Unidades Haugh y grosor de cascarón (Cheng y Hsu, 1997; Uyanik *et al.*, 2002; Piva *et al.*, 2003; Lien *et al.*, 2004).

En el caso del cobre, Pesti y Bakalli (1998) y Abaza *et al.* (2009) indican que este mineral mejora la conversión alimenticia y la producción de huevo cuando se suplementa en niveles de 100 a 250 mg Cu kg<sup>-1</sup> de dieta sin afectar parámetros relacionados con la calidad de huevo. Bañuelos (2009) concluyó que la suplementación con 75 a 150 mg Cu kg<sup>-1</sup> dieta, incrementa la producción de huevo en 11.3%, la masa de huevo 13.1% y reduce la conversión alimenticia en 13.5%, comparado con un grupo de aves sin suplementar. En lo que respecta a la calidad de huevo, Idowu *et al.* (2006) indican que 250 mg Cu kg<sup>-1</sup> de dieta, usando como fuente al sulfato de cobre pentahidratado, incrementan las Unidades Haugh como indicativo de la calidad de la albúmina y el peso del huevo sin ningún efecto en el grosor de cascarón. Sin embargo, Bañuelos (2009) indica que niveles de 75 hasta 150 mg Cu kg<sup>-1</sup> de dieta redujeron la altura de la albúmina y las Unidades Haugh.

En el presente estudio se evaluaron los efectos de la suplementación dietética de diferentes niveles de cromo y cobre, y su interacción en los parámetros productivos y calidad física del huevo; así mismo se calcularon los niveles de suplementación de Cr y Cu para optimizar los parámetros productivos y económicos, entre ellos se minimizó conversión alimenticia, maximizó masa de huevo por ave al día, y utilidades al productor en dietas para gallina de postura.

### **3.4 Materiales y métodos**

Se usaron 360 gallinas Leghorn Bovans White en su primer ciclo de postura, repartidas en ocho tratamientos con cinco repeticiones cada uno. Las unidades experimentales se conformaron por nueve gallinas y fueron distribuidas al azar en dos aves por jaula. El agua y el alimento se proporcionaron a libre acceso durante doce semanas de prueba. Las dietas utilizadas (Cuadro 4) fueron elaboradas a base de sorgo y pasta de soya, calculadas para cubrir los requerimientos nutrimentales de la línea Bovans White (Hendrix Genetics Company, 2008). Los niveles suplementarios de cromo fueron 0.0, 1.2, 2.4 y 3.6 mg Cr kg<sup>-1</sup> de dieta, usando como fuente picolinato de cromo (0.04%) y los niveles de cobre fueron 0.0 y 117 mg Cu kg<sup>-1</sup> de dieta, usando como fuente sulfato de cobre pentahidratado (25.2%). El ensayo biológico comprendió el periodo de 31 a 42 semanas de edad de las aves.

El comportamiento productivo se evaluó con registros semanales de consumo de alimento para posteriormente calcular el consumo de alimento (CONSUMO g a<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>) ave día. Diariamente se obtuvo la masa de huevo (g a<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup> MDH) por ave y el porcentaje de postura (PPOST). Con los valores de CONSUMO y MDH se calculó la conversión alimenticia (CA).

La evaluación de la calidad física del huevo se realizó en los días 3, 31, 59 y 87 del experimento en las instalaciones del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán (INCMNSZ), con un equipo automatizado (Technical Services y Supplies, Inc) en el que se midió el peso del huevo (PH g) con una báscula digital de interface con reflectómetro, al igual que el medidor

de la altura de la albúmina (AALB) que automáticamente calcula las unidades Haugh (UH); el color de yema (CY) se midió con un colorímetro de Roche electrónico, mismo que se encontraba conectado al software Eggware Windows 98/NT/ME/XP-programa de calidad de huevo, mientras que el grosor de cascarón ( $\mu\text{m}$ , GC) se midió con un micrómetro digital de manera manual.

Para el análisis de la información del comportamiento productivo y calidad física del huevo se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, donde los factores evaluados fueron los niveles de Cr (0, 1.2, 2.4 y 3.6 mg Cr  $\text{kg}^{-1}$ ) y los niveles de Cu (0 y 117 mg Cu  $\text{kg}^{-1}$ ). Para cada una de las variables se efectuó un análisis de varianza con una prueba de comparación de medias de Tukey, mediante el procedimiento GLM del programa Statistical Analysis System (SAS, 2004).

En el análisis de datos de comportamiento productivo se consideraron los datos acumulados registrados durante las 12 semanas de prueba, periodo en el cual se utilizó la misma dieta experimental para todo el ensayo biológico. Para el análisis de calidad física del huevo, se consideraron los datos obtenidos de cuatro mediciones, efectuadas los días 3, 31, 59 y 87 del ensayo realizados en los laboratorios del INCMNSZ.

El modelo estadístico utilizado para el análisis de la información fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + E_i + NCr_j + NCu_k + NCr_j * NCu_k + E_{ijkl} \dots \dots \dots [1]$$

donde:  $Y_{ijkl}$  es la variable de respuesta;  $E_i$  corresponde a la  $i$ -ésima semana de edad de las aves;  $NCr_j$  es el  $j$ -ésimo nivel de Cr suplementado;  $NCu_k$  es el  $k$ -ésimo nivel de Cu suplementado;  $NCr_j * NCu_k$  es la interacción del  $NCu * NCr$ ; y  $E_{ijkl}$  es el error experimental,  $E_{ijkl} \sim NI(0, \sigma^2)$ .

Para determinar y predecir la respuesta de las variables estudiadas en función de la suplementación de cromo y cobre, se realizó un análisis de regresión para predecir el efecto lineal, cuadrático o cúbico de los factores evaluados, así como una posible interacción entre ellos.

Cuadro 4. Tratamientos<sup>z</sup> y dieta base usada durante el experimento.

Ingrediente, %	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Sorgo	58.58	58.58	58.58	58.58	58.58	58.58	58.58	58.58
Pasta de soya	26.32	26.32	26.32	26.32	26.32	26.32	26.32	26.32
Aceite de soya	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22
Carbonato de calcio	9.55	9.55	9.55	9.55	9.55	9.55	9.55	9.55
Fosfato dicálcico	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
DL-Metionina	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Treonina	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Premezcla de minerales <sup>y</sup>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Premezcla de vitaminas <sup>x</sup>	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Sal	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Pigmento	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Picolinato de cromo (0.04% de Cr)	0.00	0.30	0.60	0.90	0.00	0.3	0.60	0.90
Sulfato de cobre (25.2% de Cu)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05
Arena <sup>w</sup>	0.95	0.65	0.35	0.05	0.90	0.60	0.30	0.00
Total	100	100	100	100	100	100	100	100
Análisis nutrimental calculado								
EM, Mcal kg <sup>-1</sup>	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
Proteína cruda, %	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00
Metionina digestible, %	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Lisina digestible, %	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
Treonina digestible, %	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
Metionina + Cistina, %	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
Calcio, %	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10
Fósforo disponible, %	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Cromo calculado, mg kg <sup>-1</sup>	0	1.2	2.4	3.6	0	1.2	2.4	3.6
Cobre analizado, mg kg <sup>-1</sup>	9.1	9.4	7.2	7.4	113.7	118.1	119.3	115.4

<sup>z</sup> Tratamientos: T1 (0 mg Cr kg<sup>-1</sup> y 0 mg Cu kg<sup>-1</sup>); T2 (1.2 mg Cr kg<sup>-1</sup> y 0 mg Cu kg<sup>-1</sup>); T3 (2.4 mg Cr kg<sup>-1</sup> y 0 mg Cu kg<sup>-1</sup>); T4 (3.6 mg Cr kg<sup>-1</sup> y 0 mg Cu kg<sup>-1</sup>); T5 (0 mg Cr kg<sup>-1</sup> y 177 mg Cu kg<sup>-1</sup>); T6: (1.2 mg Cr kg<sup>-1</sup> y 177 mg Cu kg<sup>-1</sup>); T7: (2.4 mg Cr kg<sup>-1</sup> y 177 mg Cu kg<sup>-1</sup>), y T8: (3.6 mg Cr kg<sup>-1</sup> y 177 mg Cu kg<sup>-1</sup>); <sup>y</sup> La premezcla de minerales no tenía Cu ni Cr y aportaba 240 mg kg<sup>-1</sup> Mg, 1.40 mg kg<sup>-1</sup> de I, 200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn, 0.80 mg kg<sup>-1</sup> de Se, 240 mg kg<sup>-1</sup> de Fe y 0.40 mg kg<sup>-1</sup> de Co; <sup>x</sup>La premezcla de vitaminas incluyó por tonelada 7,700,000 UI de Vit. A, 3,300,000 UI de Vit. D3, 6,600 UI Vit. E, 550 mg Vit. K, 1.8 mg de Tiamina, 8.8 mg de Vit. B12, 4.4 g de Riboflavina, 110 mg de Ácido Fólico, 55 mg de Biotina, 5.5 g de Ácido Pantoténico, 22 g de Niacina y 275 g de Colina; <sup>w</sup> Los niveles de la fuentes de Cu y Cr sustituyeron a la arena en la dieta.

El modelo de regresión usado fue:

$$Y_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 * E_i + \beta_2 * NCr_j + \beta_3 * NCu_k + \beta_4 * (NCr_i)^2 + \beta_5 * (Cr_i)^3 + \beta_6 * NCu_i * NCr_j + E_{ijk}$$

.....[2]

donde:  $Y_{ijk}$  es la variable de respuesta;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  y  $\beta_6$  son los coeficientes de regresión estimados;  $E_i$  corresponde a la i-ésima semana de edad de las aves;  $NCr_j$  es el j-ésimo nivel de Cr suplementado;  $NCu_k$  es el k-ésimo nivel de Cu suplementado;  $NCr_j * NCu_k$  es la interacción del  $NCr * NCu$ ; y  $E_{ijk}$  es el error aleatorio,  $E_{ijk} \sim NI(0, \sigma^2)$ .

Posteriormente, se realizó un análisis econométrico para calcular el nivel óptimo biológico (NOB) de suplementación con Cr y Cu que maximizara porcentaje de postura (Max PPOST), minimizara consumo de alimento (Min CONSUMO), maximizara MH (Max MH), minimizara CA (Min CA), y para calcular el nivel óptimo económico (NOEMaxU) que maximizara utilidades al productor. La solución de los NOB y NOE se calcularon con el optimizador del programa Excel utilizando el siguiente modelo econométrico.

Función Objetivo:

$$Y_{ikl} = Q(E_i, NCr_j, NCu_k)$$

sujeto a:

$$Ax \geq b, x \geq 0 \text{ .....[3]}$$

Donde:  $Y_{ijk}$  es la variable respuesta estimada por la ecuación de regresión,  $Q$  que estima el efecto del nivel ( $NCr_i$ ) de cromo, el nivel ( $NCu_j$ ) de cobre y la interacción ( $NCr * NCu_k$ ) de los minerales en la semana i-ésima ( $S_i$ ), sujetos al aporte de nutrimentos (A) de los ingredientes (x) de la dieta para cubrir los requerimientos nutrimentales (b) de las aves, incluyendo los niveles experimentales del cromo y cobre, y  $x \geq 0$ , es la condición de no negatividad, misma que no permite valores negativos de los ingredientes en la dieta.

Para calcular el NOEMaxU se utilizaron los datos acumulados de MDH y CONSUMO obtenidos durante las 12 semanas, lo cual permite obtener los valores totales de ingresos y egresos durante el periodo de prueba, siendo estos valores de importancia para el productor, para lo cual se utilizó el siguiente modelo econométrico:

#### Función Objetivo

Maximizar  $U = \text{Ingresos} - \text{Egresos}$

Ingresos (\$) = masa de huevo \* (\$/kg de huevo)

Egresos (\$) = consumo de alimento \* (\$/kg de alimento)

Función objetivo:

$$Y_{ikl} = Q (E_i, NCr_j, NCu_k)$$

Sujeto a:

$Ax \geq b$ , con la condición de no negatividad  $x \geq 0$ .....[4]

Donde: U es la utilidad obtenida (\$/kg de huevo), calculada como la diferencia entre los ingresos por venta de huevo (masa de huevo producida\*\$ /kg de huevo) y los egresos por costo de alimentación (consumo de alimento acumulado\*\$ /kg de alimento). La masa de huevo se expresó como  $MHA = f (Cr) + f (Cu) + f (Cr*Cu)$  y el consumo de alimento como  $CONSUMO = f (Cr) + f (Cu) + f (Cr*Cu)$ . El resto del modelo fue similar al modelo [3]. Además, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar cómo se afecta el NOEMaxU como respuesta a los posibles cambios en el precio del huevo, partiendo de un precio base de \$19.00/kg, y como respuesta al cambio en el precio del picolinato de cromo, partiendo de \$66.00/kg, ambos precios vigentes en el mes de mayo de 2010.

### 3.5 Resultados y discusión

#### Variables productivas

El análisis de varianza y la comparación de medias del comportamiento productivo mostró que la edad de la gallina afectó ( $p \leq 0.05$ ) todas las variables analizadas, además que la suplementación con Cr produce diferencias ( $p \leq 0.05$ ) en porcentaje de postura (PPOST), la masa diaria de huevo en gramos (MDH  $g a^{-1} d^{-1}$ ) y la conversión alimenticia (CA). Sin embargo, el consumo (CONSUMO  $g a^{-1} d^{-1}$ ) diario de alimento ( $p > 0.05$ ) no se vio modificado por el nivel de cromo. El nivel de Cu suplementado tuvo efecto ( $p \leq 0.05$ ) en el consumo de alimento, masa diaria de huevo y la conversión alimenticia, sin modificar ( $p > 0.05$ ) el porcentaje de postura (Cuadro 5). De igual forma se detectó ( $p \leq 0.05$ ) interacción (Cu\*Cr) en porcentaje de postura, masa diaria de huevo, conversión alimenticia, lo cual indica que la respuesta al adicionar ambos minerales induce una respuesta diferente a la producida con la suplementación de cromo solamente; mientras que la interacción para consumo diario de alimento no fue significativa (Cuadro 5).

En lo referente a los resultados de la suplementación con Cr, el porcentaje de postura se afectó ( $p \leq 0.05$ ) negativamente con  $2.4 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de alimento. La adición con  $3.6 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de alimento redujo ( $p \leq 0.05$ ) en 1.6 unidades porcentuales la conversión alimenticia debido a un incremento de 0.59% en la masa diaria de huevo ( $0.35g a^{-1} d^{-1}$ ). Investigaciones realizadas (Uyanik *et al.*, 2002) con  $20 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de alimento y (Sahin *et al.*, 2002) con  $0.4 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de alimento concuerdan que la suplementación con Cr mejora la eficiencia alimenticia en gallinas en postura. No obstante, Oba *et al.* (2005) indican que suplementar  $1 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de dieta no modifica la conversión alimenticia. Estas diferencias en resultados son desconocidas, aunque posiblemente puedan deberse a la diferencia de estirpes utilizadas en cada experimento. No obstante, existen investigaciones que difieren con los resultados encontrados en este experimento. Piva *et al.* (2003) con niveles adicionados de  $24.13 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de dieta (cloruro de cromo),  $36.27 \text{ mg kg}^{-1}$  de dieta (cromo en levadura) y  $47.53 \text{ mg}$

Cr kg<sup>-1</sup> de dieta (aminoniacinato), Lien *et al.* (2004) con 0.8 ó 1.6 mg Cr kg<sup>-1</sup> de dieta (picolinato de cromo) y Wong y Engku Azahan (2004) con 0.4 y 0.8 mg Cr kg<sup>-1</sup> de alimento (cloruro de cromo y cromo en levadura) determinaron que no hubo respuesta de la suplementación en producción, peso de huevo y conversión alimenticia, lo cual puede deberse al nivel de cromo suplementado y a la forma química en que se adicionó la fuente de cromo, ya que las fuentes inorgánicas son pobremente absorbidas y los niveles altos de cromo pueden tener efectos detrimentales en las variables productivas (Wong y Engku Azahan, 2004).

De igual manera se encontró que la suplementación con 117 mg Cu kg<sup>-1</sup> de alimento afectó ( $p \leq 0.05$ ) el consumo diario de alimento, masa diaria de huevo y conversión alimenticia, sin modificar el porcentaje de postura ( $p \geq 0.05$ ). La conversión alimenticia se redujo 2.6% debido a un aumento en la masa de huevo de 1.5%, asociado a una reducción en el consumo de alimento de 0.9 g a<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (0.8%). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Pesti y Bakalli, (1998) e Idowu *et al.* (2006) quienes encontraron que al suplementar 75 a 250 mg Cu kg<sup>-1</sup> de alimento, la conversión alimenticia se mejoraba hasta 22.3% y con los resultados reportados por Banks *et al.* (2004), Lien *et al.* (2004) y Oba *et al.* (2005) quienes indicaron que 250 mg Cu kg<sup>-1</sup> de alimento no afectan el porcentaje de postura. El resultado en la masa diaria de huevo como respuesta a suplementación de Cu puede explicarse en función de lo reportado por Bañuelos (2009), quien concluyó que 117 mg Cu kg<sup>-1</sup> de dieta corresponde al nivel óptimo biológico para maximizar masa de huevo. A pesar de que en esta investigación se obtuvieron respuestas positivas al suplementar Cu, existen investigaciones (Banks *et al.*, 2004; Oba *et al.*, 2005) que indican que suplementar Cu no modifica el consumo diario de alimento y la conversión alimenticia, e incluso Ankari *et al.* (1998) y Liu *et al.* (2005) reportaron que la suplementación con 250 ó 260 mg Cu kg<sup>-1</sup> de alimento puede afectar negativamente algunos parámetros productivos como producción de huevo y conversión alimenticia, lo cual puede deberse a que niveles mayores a 250 mg

Cu kg<sup>-1</sup> de dieta producen lesiones en la capa protectora de la molleja (NRC, 1994) y afectar la retención de minerales como fósforo (Banks *et al.*, 2004).

En lo que concierne a las interacciones, se detectaron diferentes respuestas en el análisis de varianza para las variables productivas PPOST, MDH y CA (Cuadro 5) las cuales son representadas como porcentaje de postura (Figura 5), masa diaria de huevo (Figura 6) y conversión alimenticia (Figura 7) en las que se puede apreciar que la adición de cobre influyó en la respuesta a la suplementación de cromo, produciendo una respuesta diferente en comparación a la mejora obtenida con la suplementación única de cromo, lo cual se puede deber a que ambos minerales están involucrados en el metabolismo de carbohidratos, que se ve reflejado en una mejor respuesta productiva.

Los coeficientes utilizados (Cuadro 6) para el análisis de regresión mostraron que existe una interacción de los minerales suplementados en la dieta y que la suplementación con Cu coadyuvó a que la respuesta en masa diaria de huevo (Figura 9) y conversión alimenticia (Figura 10) fuesen superiores en comparación a la respuesta obtenida al suplementar Cr solamente, e incluso la suplementación de cromo por sí solo, afectó de manera negativa la conversión alimenticia y disminuyó la masa diaria de huevo.

Los modelos econométricos utilizados para determinar los niveles óptimos biológicos (NOB) de suplementación (Cuadro 7) determinaron que los valores de suplementación de cromo y cobre para Max PPOST, Min CONSUMO de alimento (Figura 8) Max MH (Figura 9) y Min CA (Figura 10) son idénticos y corresponden a 117 mg Cu Kg<sup>-1</sup>dieta y 3.6 mg Cr Kg<sup>-1</sup>dieta.

Cuadro 5. Comportamiento productivo de gallinas suplementadas con cromo y cobre durante 12 semanas de experimentación, en porcentaje de postura (PPOST), consumo diario de alimento (CONSUMO) por ave, masa diaria de huevo (MDH) y conversión alimenticia (CA).

Parámetro	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg kg <sup>-1</sup> )				Medias <sup>z</sup>	EEM	Significancia			
		0	1.2	2.4	3.6			Edad	Cu	Cr	Cu*Cr
PPOST	0	97.4	95.4	92.9	95.7	95.3	0.23				
	117	94.4	96.4	95.1	96.8	95.7	0.23	**	NS	**	**
	Medias	95.9 <sup>a</sup>	95.9 <sup>a</sup>	94.0 <sup>b</sup>	96.3 <sup>a</sup>						
	EEM	0.32	0.32	0.32	0.32						
CONSUMO (g a <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	0	111.5	110.4	109.8	109.9	110.4 <sup>a</sup>	0.21				
	117	109.4	109.9	109.8	109.0	109.5 <sup>b</sup>	0.21	**	**	NS	NS
	Medias	110.4	110.2	109.8	109.4						
	EEM	0.3	0.3	0.3	0.3						
MDH (g a <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	0	59.5	58.4	56.5	58.6	58.2 <sup>a</sup>	0.14				
	117	58.0	59.1	59.7	59.6	59.1 <sup>b</sup>	0.14	**	**	*	**
	Medias	58.7 <sup>ab</sup>	58.8 <sup>ab</sup>	58.1 <sup>b</sup>	59.1 <sup>a</sup>						
	EEM	0.2	0.2	0.2	0.2						
CA	0	1.88	1.89	1.95	1.88	1.90 <sup>a</sup>	0.004				
	117	1.89	1.86	1.84	1.83	1.85 <sup>b</sup>	0.004	**	**	**	**
	Medias	1.88 <sup>a</sup>	1.87 <sup>ab</sup>	1.89 <sup>a</sup>	1.85 <sup>b</sup>						
	EEM	0.006	0.006	0.006	0.006						

<sup>z</sup> Medias sin una letra en común, dentro de fila o columna, son diferentes ( $p \leq 0.05$ ).

NS, \*, \*\*; No significativo, y significativo a una  $p \leq 0.05$ , 0.01, respectivamente.

EEM, error estándar de la media.

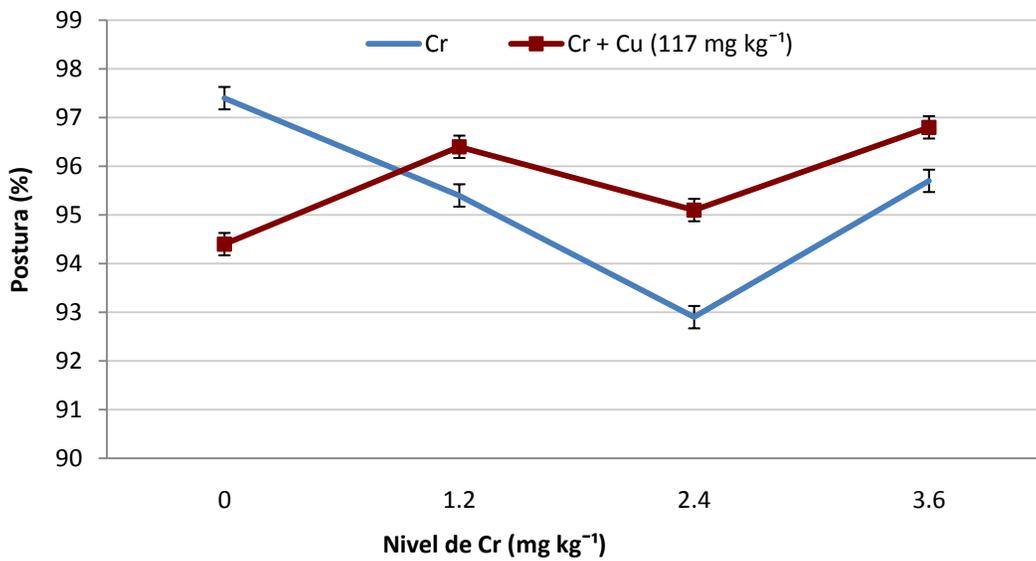


Figura 5. Porcentaje de postura (PPOST) de gallinas suplementadas con cromo y cobre en la dieta, que muestra la interacción de ambos minerales.

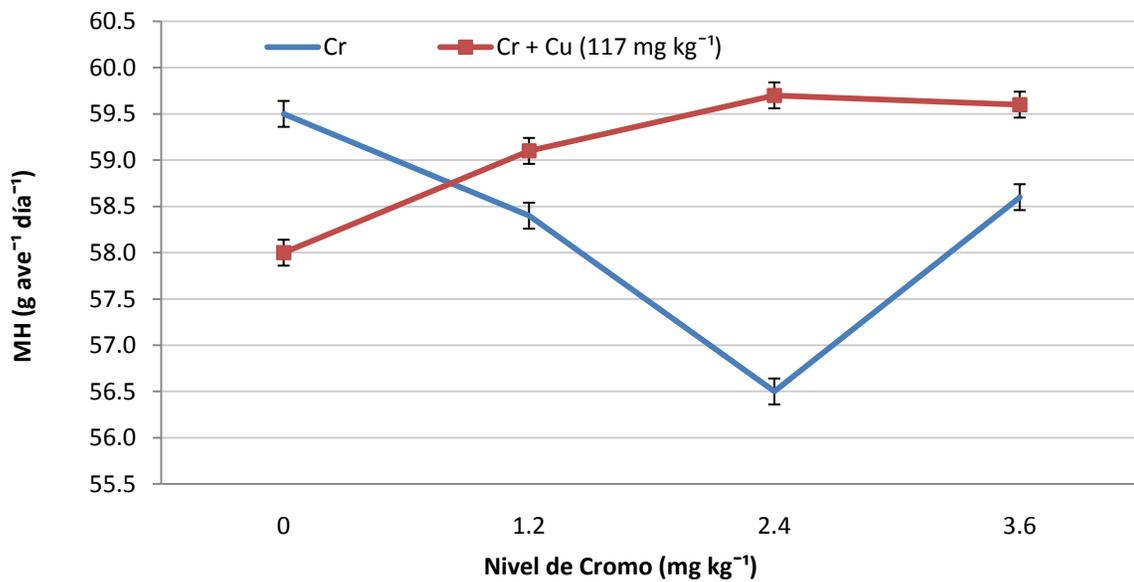


Figura 6. Masa diaria de huevo (MDH) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo y cobre en la dieta, que muestra la interacción de ambos minerales.

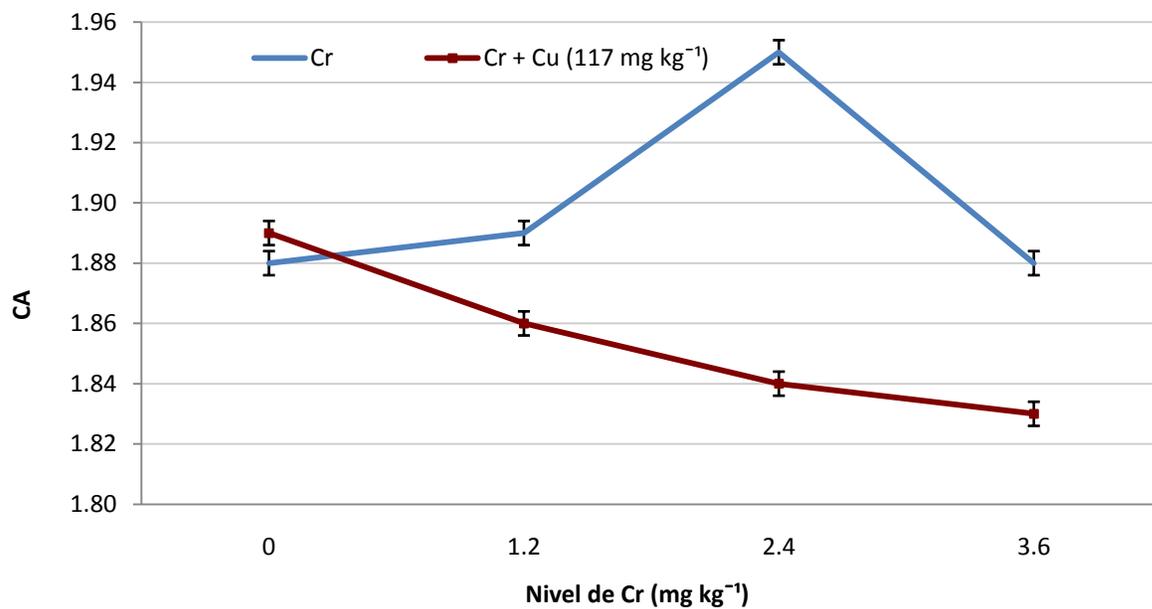


Figura 7. Conversión alimenticia (CA) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo y cobre, que muestra la interacción de ambos minerales.

Cuadro 6. Estimadores del análisis de regresión para las variables de comportamiento productivo en gallinas suplementadas con cromo (NCr) y cobre (NCu) en la dieta.

Parámetro	Consumo (g a <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )			MDH <sup>z</sup> (g a <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )			Conversión alimenticia		
	Estimador	EE	<i>p&gt;t</i>	Estimador	EE	<i>p&gt;t</i>	Estimador	EE	<i>p&gt;t</i>
Intercepto	113.455	2.1789	<0.01	66.6202	1.2057	<0.01	1.6773	0.0397	<0.01
Edad	- 0.0700	0.0589	0.23	- 0.2067	0.0321	<0.01	0.0057	0.0010	<0.01
NCu	- 0.0076	0.0035	0.03	- 0.0058	0.0032	0.07	- 0.00005	0.0001	0.65
NCr	- 0.2737	0.1510	0.07	0.5543	0.7128	0.43	0.0302	0.0235	0.19
NCr <sup>2</sup>				- 1.0532	0.5214	0.04	0.0398	0.0172	0.02
NCr <sup>3</sup>				0.2251	0.0955	0.02	- 0.0085	0.0031	0.01
NCu*NCr				0.0071	0.0014	<0.01	- 0.0002	0.00005	0.01
R <sup>2</sup>	0.019			0.162			0.169		

<sup>z</sup> Masa diaria de huevo

Cuadro 7. Niveles óptimos biológicos de cobre (NCu) y cromo (NCr) suplementario en dieta para gallinas de postura.

Optimización	NCu (mg kg <sup>-1</sup> )	NCr (mg kg <sup>-1</sup> )	PPOST <sup>x</sup>	CONSUMO	MDH <sup>y</sup>	CA <sup>z</sup>
Max PPOST	117	3.6	96	108.8	59.5	1.83
Min CONSUMO	117	3.6	96	108.8	59.5	1.83
Max MDH	117	3.6	96	108.8	59.5	1.83
Min CA	117	3.6	96	108.8	59.5	1.83

<sup>x</sup> Porcentaje de postura; <sup>y</sup> Masa diaria de huevo; <sup>z</sup> Conversión alimenticia.

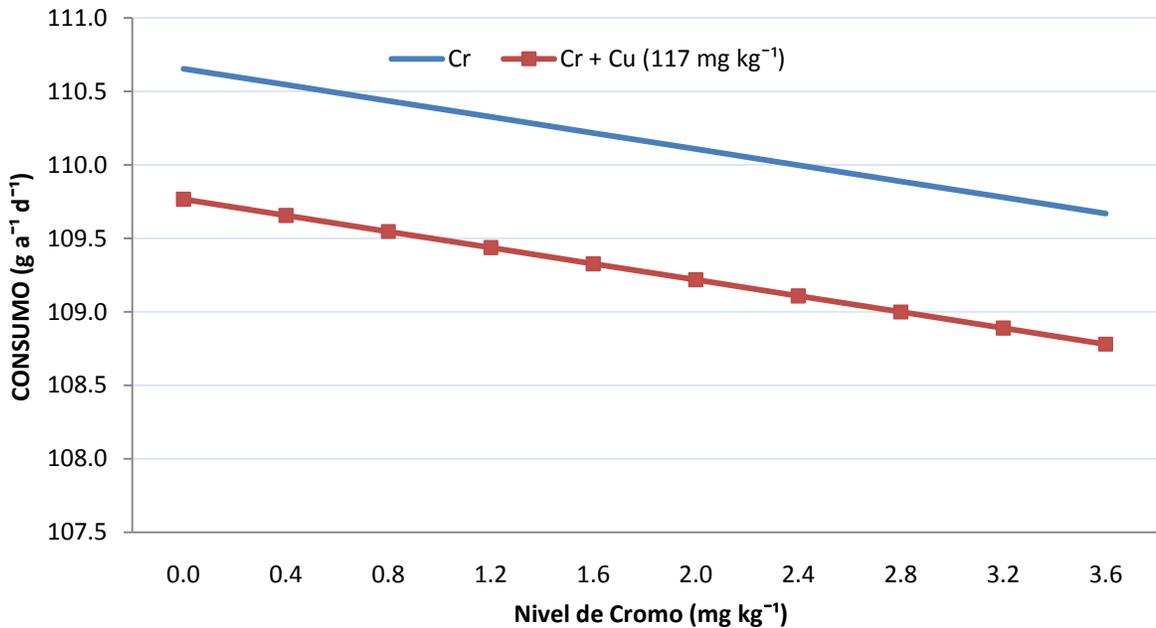


Figura 8. Consumo diario de alimento (CONSUMO g a<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta.

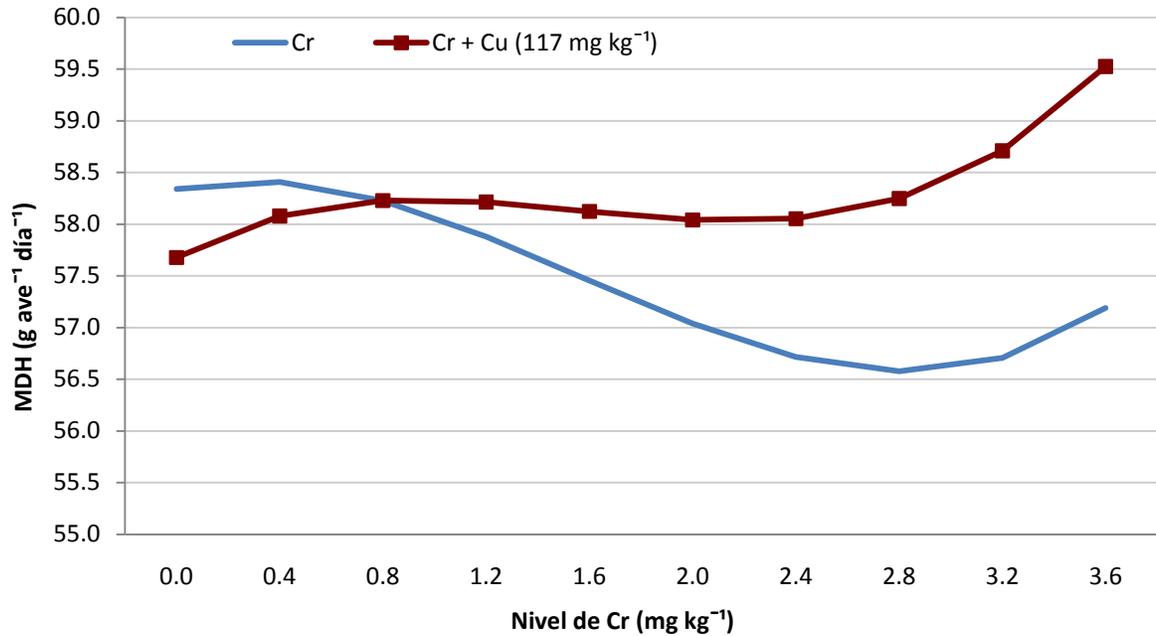


Figura 9. Masa diaria de huevo (MDH) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta.

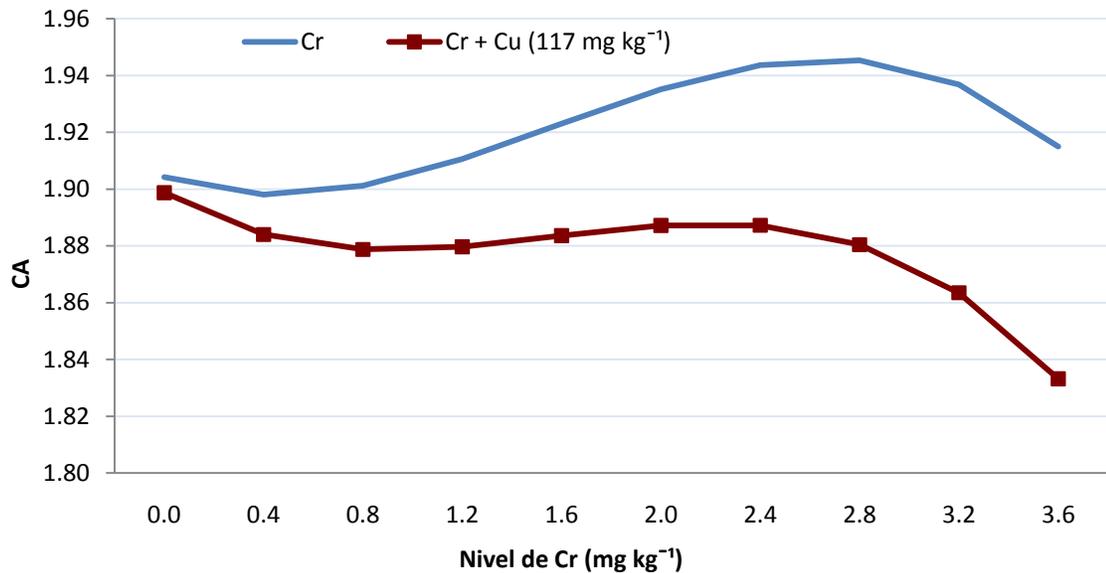


Figura 10. Conversión alimenticia (CA) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta.

## Calidad física del huevo

El análisis de varianza y la comparación de medias mostró que la edad de las gallinas afectó ( $p \leq 0.05$ ) todas las variables de calidad medidas, de igual manera el nivel de Cr suplementado afectó ( $p \leq 0.05$ ) el peso de huevo, la altura de albúmina, las Unidades Haugh, el color de yema y el grosor del cascarón. En lo que respecta a la suplementación de Cu se encontró efecto ( $p \leq 0.05$ ) en peso de huevo y grosor de cascarón, detectándose interacción ( $p \leq 0.05$ ) del nivel de Cu\*Cr en la altura de la albúmina, Unidades Haugh y color de yema (Cuadro 8).

La suplementación con  $2.4 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  dieta produjo el mejor peso de huevo (Figura 11) y la mejor pigmentación de la yema. Debski *et al.* (1998), Sahin *et al.* (2001) y Sahin *et al.* (2002) reportaron que la suplementación con  $0.4$  a  $0.8 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de dieta mejoran el peso del huevo, mientras que Piva *et al.* (2003) y Oba *et al.* 2005 mencionan que la suplementación con Cr no afecta el color de la yema.

El nivel de  $1.2 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de dieta produjo la mejor altura de la albúmina, Unidades Haugh y grosor del cascarón (Figura 12). Sahin *et al.* (2001) y Sahin *et al.* (2002) mencionan que niveles de  $0.4$  a  $0.8 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de dieta mejoran dichas variables. Sin embargo, Uyanik *et al.* (2002) y Piva *et al.* (2003), quienes suplementaron de  $20$  a  $47.5 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de alimento no encontraron mejorías en estas variables, posiblemente debido a los niveles altos utilizados en sus investigaciones. Los mecanismos por los cuales el Cr puede actuar para mejorar la calidad del huevo, sugeridos por Jensen y Maurice (1980), son a través de su función como componente estructural de la albúmina o uniendo las proteínas que la conforman, además de ser un mineral necesario para la síntesis de ovomucina, que es un gel importante en la estructura de la albúmina y por su papel como facilitador en la transferencia de cationes a la albúmina del huevo durante su formación en el útero.

La suplementación dietética de Cu incrementó 1.4 g el peso del huevo (2.3%) y el grosor del cascarón en 1.1%. Paik (2001), reportó que mediante la suplementación con proteinato de cobre se puede mejorar la calidad del cascarón hasta en 5% por arriba de los parámetros obtenidos con sulfato de cobre que se encuentran en 3% por arriba comparado con gallinas sin suplementar cobre en dieta. Mabe *et al.* (2003) indican que el cobre determina la consistencia estructural del cascarón mediante su participación en la lisil oxidasa, que es una cuproenzima de importancia crucial en la formación del mismo, por lo cual el grosor del cascarón se incrementó en respuesta al nivel suplementario de cobre.

En lo que respecta a la suplementación conjunta de Cr más Cu, el análisis de regresión mostró (Cuadro 9) que existe una interacción de los minerales suplementados para la altura de albúmina, Unidades Haugh y color de yema, lo que indica que la respuesta a la suplementación de cobre y cromo es diferente a la respuesta de suplementar cromo por separado, lo cual demuestra que la suplementación con Cu coadyuvó, a que el peso del huevo (Figura 13) y el grosor del cascarón fueran superior en comparación a la respuesta obtenida al suplementar Cr solamente (Figura 14). Estas respuestas obtenidas, pueden deberse a que el Cu es componente esencial de numerosas enzimas, como lisil oxidasa y súperóxido dismutasa, entre otras, mismas que intervienen en la formación del cascarón, en la pigmentación y en el metabolismo de la energía, además de otros procesos biológicos (Cromwell *et al.*, 1998; Linder, 2002).

Cuadro 8. Calidad física del huevo de gallinas suplementadas con cromo (Cr) y cobre (Cu) durante 12 semanas de experimentación.

Parámetro	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg kg <sup>-1</sup> )				Medias <sup>z</sup>	EEM	Significancia			
		0	1.2	2.4	3.6			Edad	Cu	Cr	Cu*Cr
PH <sup>y</sup>	0	59.9	59.8	62.2	62.1	61.0 <sup>a</sup>	0.33				
	117	61.5	63.0	63.1	62.2	62.4 <sup>b</sup>	0.33	**	*	*	NS
	Medias	60.7 <sup>b</sup>	61.4 <sup>ab</sup>	62.6 <sup>a</sup>	61.2 <sup>ab</sup>						
	EEM	0.46	0.46	0.46	0.46						
AALB <sup>x</sup> (mm)	0	6.4	6.2	6.5	6.3	6.36	0.06				
	117	6.3	6.9	6.2	6.1	6.38	0.06	**	NS	*	**
	Medias	6.4 <sup>ab</sup>	6.5 <sup>a</sup>	6.4 <sup>ab</sup>	6.2 <sup>b</sup>						
	EEM	0.08	0.08	0.08	0.08						
UH <sup>w</sup>	0	77.9	76.8	78.3	77.2	77.5	0.44				
	117	77.6	81.0	75.5	75.0	77.3	0.44	**	NS	*	*
	Medias	77.8 <sup>ab</sup>	78.9 <sup>a</sup>	76.9 <sup>ab</sup>	76.11 <sup>b</sup>						
	EEM	0.62	0.62	0.62	0.62						
CY <sup>v</sup>	0	7.3	6.7	7.3	7.2	7.1	0.40				
	117	6.9	7.4	7.5	7.1	7.2	0.40	**	NS	**	**
	Medias	7.1 <sup>a</sup>	7.0 <sup>a</sup>	7.4 <sup>b</sup>	7.1 <sup>a</sup>						
	EEM	0.06	0.06	0.06	0.06						
GC <sup>u</sup> (µm)	0	350	362	359	360	358 <sup>a</sup>	1.55				
	117	360	365	362	363	362 <sup>b</sup>	1.55	**	*	*	NS
	Medias	355 <sup>b</sup>	364 <sup>b</sup>	360 <sup>ab</sup>	361 <sup>ab</sup>						
	EEM	2.2	2.2	2.2	2.2						

<sup>z</sup> Medias sin una letra en común, dentro de fila y columna, son diferentes ( $p \leq 0.05$ ); <sup>y</sup> Peso de huevo; <sup>x</sup> Altura de albúmina; <sup>w</sup> Unidades Haugh; <sup>v</sup> Color de yema; <sup>u</sup> Grosor de cascarón.

NS, \*, \*\*; No significativo, y significativo a una  $p \leq 0.05$ , 0.01, respectivamente.

EEM, error estándar de la media.

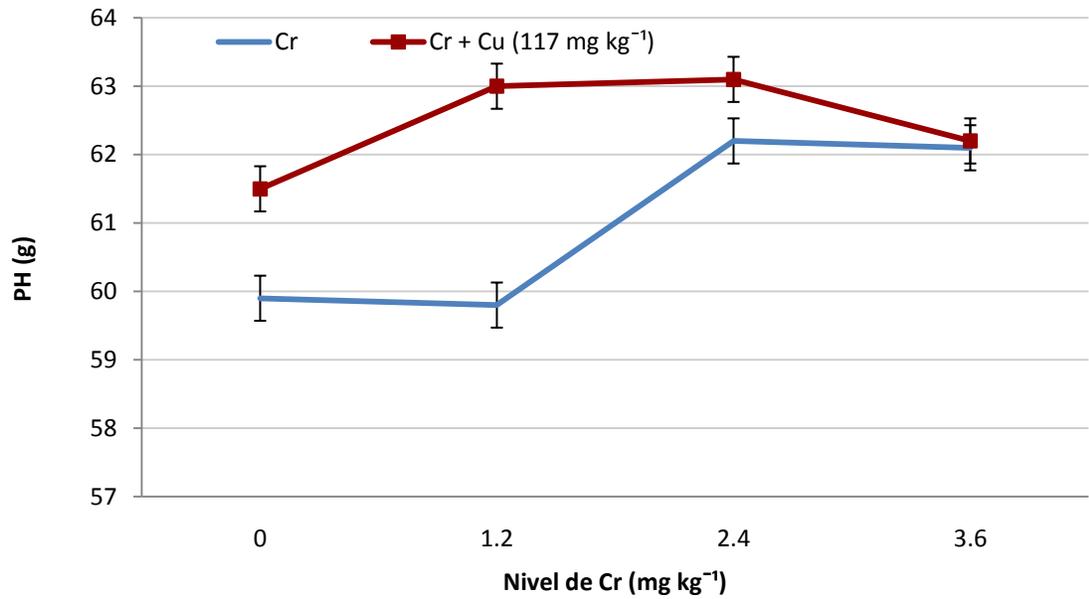


Figura 11. Peso del huevo (PH) en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta.

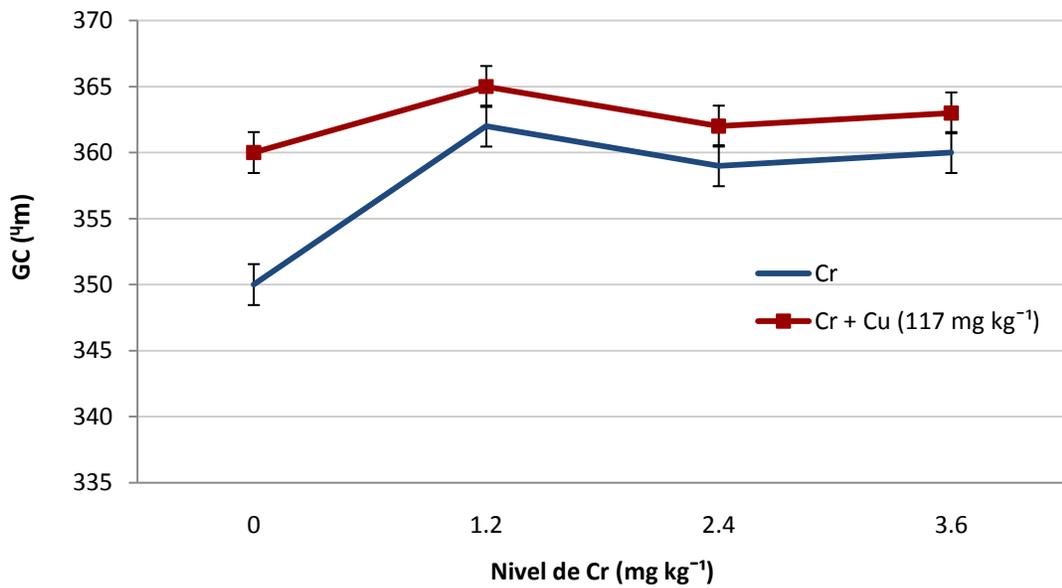


Figura 12. Grosor de cascarón (GC) en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en dieta de gallinas en postura.

Cuadro 9. Estimadores del análisis de regresión para las variables de calidad de huevo<sup>z</sup> en gallinas suplementadas con cromo (N<sub>Cr</sub>) y cobre (N<sub>Cu</sub>) en la dieta.

Parámetro	PH <sup>z</sup>		ALB <sup>y</sup>		UH <sup>x</sup>		CY <sup>w</sup>		GC <sup>v</sup>	
	Estimador (EE)	<i>p&gt;t</i>	Estimador (EE)	<i>p&gt;t</i>	Estimador (EE)	<i>p&gt;t</i>	Estimador (EE)	<i>p&gt;t</i>	Estimador (EE)	<i>p&gt;t</i>
Intercepto	61.593 (0.705)	<0.01	-1.867 (0.4415)	<0.01	16.2517 (0.5068)	<0.01	3.3594 (0.43045)	<0.01	408.496 (10.191)	<0.01
Edad	0.0139 (0.0189)	0.46	0.222 (0.0115)	<0.01	1.6598 (0.0911)	<0.01	0.1004 (0.0112)	<0.01	-1.428 (0.268)	<0.01
N <sub>Cu</sub>	0.0061 (0.0011)	<0.01	0.0028 (0.0014)	0.14	0.0139 (0.0116)	0.23	0.0007 (0.0008)	0.37	0.0391 (0.0204)	0.06
N <sub>Cr</sub>	-0.783 (0.4174)	0.06	0.0068 (0.0541)	0.89	-0.0532 (0.4295)	0.90	-0.6083 (0.3212)	0.06	1.267 (0.893)	0.16
N <sub>Cr</sub> <sup>2</sup>	0.693 (0.307)	0.02					0.5703 (0.2366)	0.01		
N <sub>Cr</sub> <sup>3</sup>	-0.129 (0.0563)	0.02					-0.1107 (0.0433)	0.01		
N <sub>Cu</sub> *N <sub>Cr</sub>			-0.0011 (0.0006)	0.0838	-0.009 (0.0052)	0.0836				
R <sup>2</sup>	0.0737		0.7105		0.6860		0.3667		0.1791	

<sup>z</sup> Peso de huevo; <sup>y</sup> Altura de albúmina; <sup>x</sup> Unidades Haugh; <sup>w</sup> Color de yema; <sup>v</sup> Grosor de cascarón.

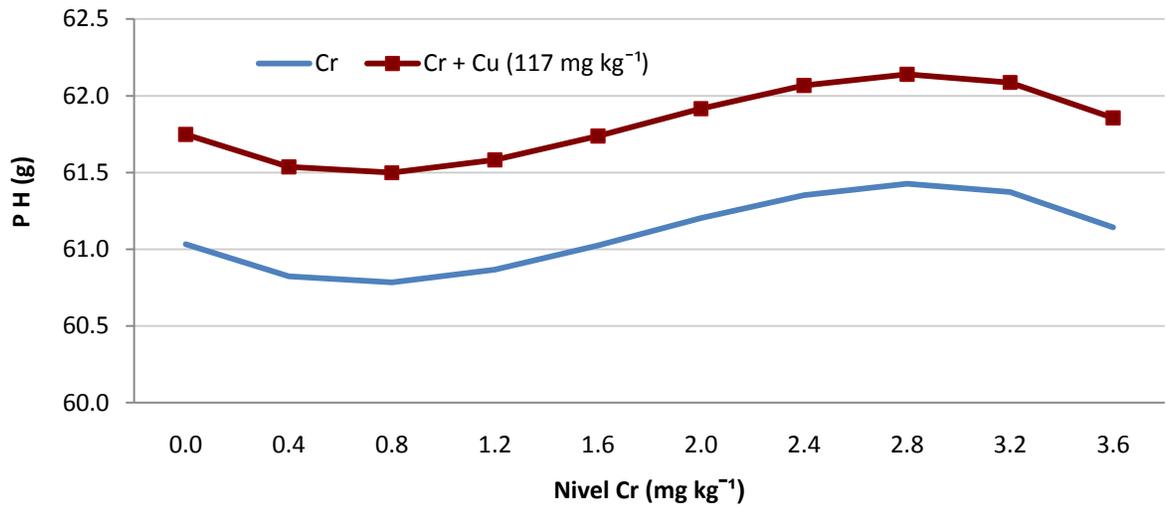


Figura 13. Peso de huevo (PH) de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta.

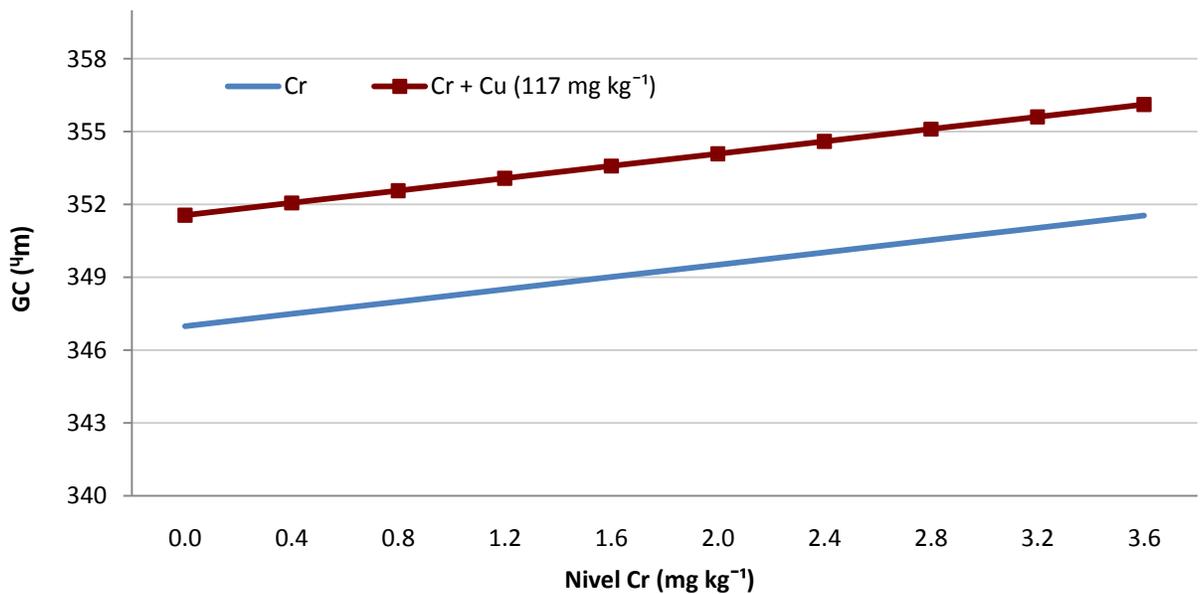


Figura 14. Grosor de cascarón (GC) del huevo de gallinas en respuesta a la suplementación de cromo (Cr) y cobre (Cu) en la dieta.

Los parámetros de regresión (Cuadro 10) utilizados en los modelos econométricos para calcular los niveles óptimos de suplementación de cromo y cobre en dieta para las variables de interés económico, mostraron que existe una interacción de los minerales suplementados. Cabe hacer la mención que los valores de  $R^2$  son altos debido a que para el análisis de regresión se tomaron los datos acumulativos de 12 semanas de experimentación, lo que implica que algunas variables están correlacionadas entre sí; por ejemplo la edad del ave con el consumo de alimento, consumo de alimento con la masa de huevo y ambas con la conversión alimenticia.

Para calcular el NOEMaxU de suplementación de cromo y cobre, se realizó un análisis de sensibilidad tomando como base de referencia un costo de \$19.00/kg de huevo y \$66.00/kg del picolinato de cromo, ambos precios vigentes en el mes de mayo de 2010. El análisis de sensibilidad mostró que pese a las mejoras biológicas obtenidas al suplementar  $117 \text{ mg Cu kg}^{-1}$  y  $3.6 \text{ mg Cr kg}^{-1}$  de dieta, las utilidades obtenidas por la reducción en el consumo de alimento y el aumento en la masa de huevo, no eran significativas económicamente aún cuando el precio del huevo estuviese al 200% del precio actual, debido principalmente al costo del picolinato de cromo. En este sentido, se determinó que la máxima utilidad (Cuadro 11) se obtenía al no suplementar cromo y cobre en la dieta. En consecuencia, los resultados de la comparación de los diferentes objetivos de optimización y sus variables asociadas, demostraron que los niveles óptimos de suplementación de cobre y cromo en dietas para gallinas en postura dependen del objetivo de optimización deseado (Cuadro 11), es decir mínima conversión alimenticia, máxima masa de huevo o máxima utilidad.

Cuadro 10. Estimadores del análisis de regresión para las variables acumulativas de comportamiento productivo en gallinas suplementadas con cromo (N<sub>Cr</sub>) y cobre (N<sub>Cu</sub>) en la dieta.

Parámetro	Consumo (g a <sup>-1</sup> )			Masa de huevo (g a <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )			Conversión alimenticia		
	Estimador	EE	<i>p&gt;t</i>	Estimador	EE	<i>p&gt;t</i>	Estimador	EE	<i>p&gt;t</i>
Intercepto	-3295.03	6.2851	<0.01	-1757.85	5.3716	<0.01	1.7807	0.0205	<0.01
Edad	110.03	0.1693	<0.01	58.73	0.143	<0.01	0.0024	0.0005	<0.01
N <sub>Cu</sub>	-0.029	0.0099	0.03	-0.022	0.0141	0.12	-0.00008	0.00005	0.14
N <sub>Cr</sub>	-2.102	0.4357	<0.01	-6.2592	1.3394	<0.01	0.0292	0.0051	<0.01
N <sub>Cr</sub> <sup>2</sup>				1.286	0.3428	0.02	-0.0082	0.0013	<0.01
N <sub>Cr</sub> <sup>3</sup>									
N <sub>Cu</sub> *N <sub>Cr</sub>				0.039	0.0063	<0.01	-0.00014	0.00002	<0.01
R <sup>2</sup>	0.9988			0.9972			0.3308		

Cuadro 11. Niveles óptimos de suplementación de cromo (NCr) y cobre (NCu) conforme al objetivo de optimización.

Objetivo de optimización	NCr (mg kg <sup>-1</sup> )	NCu (mg kg <sup>-1</sup> )	Costo dieta (\$/kg)	Consumo (g a <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	Egresos (\$)	MH (g a <sup>-1</sup> )	Ingreso (\$)	Utilidad (\$)
Min costo dieta (\$/kg <sup>-1</sup> )	0	0	4.607	1326.24	6.11	708.83	13.47	7.358
Min Consumo (g a <sup>-1</sup> )	3.6	117	5.212	1315.26	6.855	716.81	13.62	6.764
Min egreso (\$)	0	117	4.618	1322.82	6.109	706.25	13.42	7.310
Max egreso (\$)	3.6	117	5.212	1315.26	6.855	716.81	13.62	6.764
Max MH <sup>y</sup> (g a <sup>-1</sup> )	3.6	117	5.212	1315.26	6.855	716.81	13.62	6.764
Min CA <sup>z</sup>	3.6	117	5.212	1315.26	6.855	716.81	13.62	6.764
Max ingreso (\$ a <sup>-1</sup> )	3.6	117	5.212	1315.26	6.855	716.81	13.62	6.764
Max Utilidad (\$)	0	0	4.607	1326.24	6.11	708.83	13.47	7.358

<sup>y</sup> Masa de huevo; <sup>z</sup> Conversión alimenticia.

Es importante aclarar que el nivel óptimo de cromo y cobre para maximizar utilidad fue diferente al de mínima conversión alimenticia. Si bien, al aumentar los niveles de cobre y cromo en la dieta hasta 117 y 3.6 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, se logra disminuir el consumo de alimento, aumentar la masa de huevo y consecuentemente reducir la conversión alimenticia, las mejoras biológicas se ven anuladas en el aspecto de utilidades al productor, debido a que con el aumento del nivel de cromo en la dieta a partir del picolinato de cromo, se incrementa el costo de la dieta y por lo tanto los egresos por concepto de alimentación, lo cual hace que disminuyan las ganancias. Ahora surge una pregunta: ¿Cuál debiera ser el precio del picolinato de cromo para que resultase rentable su uso? En el Cuadro 12, se realizó un análisis de sensibilidad para contestar dicha pregunta, y se encontró que el precio del producto se debe reducir a \$15.18 (23% de su precio actual) para que las utilidades que genera sean superiores a la utilidad obtenida con el precio actual del picolinato de cromo.

Cuadro 12. Calculo del precio de inclusión del picolinato de cromo (PiCr) a través de un análisis de sensibilidad.

PiCr <sup>z</sup> (\$/kg)	Cambio en precio (%)	NOE Cr <sup>y</sup>	NOE Cu <sup>x</sup>	MH <sup>w</sup>	Ingreso (\$)	Costo dieta (\$)	Consumo alimento	Egreso (\$)	Utilidad (\$)
66.00	100	0	0	708.83	13.47	4.607	1326.24	6.110	7.358
<b>15.18</b>	23	3.6	117	716.81	13.62	4.755	1315.26	6.254	7.365
13.20	20	3.6	117	716.81	13.62	4.737	1315.26	6.231	7.389
6.60	10	3.6	117	716.81	13.62	4.678	1315.26	6.152	7.467

<sup>z</sup> Picolinato de cromo; <sup>y</sup> Nivel óptimo económico de cromo; <sup>x</sup> Nivel óptimo económico de cobre; <sup>w</sup> Masa de huevo.

### **3.6 Conclusiones**

La suplementación conjunta de cobre y cromo reduce consumo de alimento, aumenta masa de huevo y en consecuencia reduce la conversión alimenticia.

El nivel óptimo biológico de cobre y cromo para minimizar consumo de alimento, maximizar masa de huevo y minimizar conversión alimenticia, son idénticos y correspondieron al nivel de 117 y 3.6 mg Cr y Cu kg<sup>-1</sup> de dieta.

La suplementación dietética de cobre y cromo aumentó el peso del huevo y el grosor del cascarón, mientras que la adición de cromo sólo mejoró la altura de albúmina, Unidades Haugh y color de yema.

La suplementación con cromo afectó de manera positiva todas las variables relacionadas con la calidad del huevo.

Los niveles óptimos de suplementación de cobre y cromo en dietas para gallinas en postura dependen del objetivo de optimización buscado.

### 3.7 Literatura citada

- Abaza, I. M., W. Ezzat, M. S. Shoeib, A. A. El-Zaiat, and I. I. Hassan. 2009. Effects of copper sulfate on productive, reproductive performance and blood constituents of laying Japanese quail fed optimal and sub-optimal protein. *International Journal of Poultry Science* 8(1): 80-89.
- Anderson, R. A. 1997. Chromium as an essential nutrient for humans. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 26: 26-35.
- Ankari, A.A., H. Najib, y A. Al Hozab. 1998. Yolk and serum cholesterol and production traits, as affected by incorporating a supraoptimal of copper in the diet of the Leghorn hen. *British Poultry Science* 39: 393-397.
- Bakalli, R. I., G. M. Pesti, W. L. Ragland, and V. Konjufca. 1995. Dietary copper in excess of nutritional requirement reduces plasma and breast muscle cholesterol in chickens. *Poultry Science* 74: 360-365.
- Banks, K. M., K. L. Thompson, J. K. Rush, and T. J. Applegate. 2004. The effects of copper source on phosphorus retention in broiler chicks and laying hens. *Poultry Science* 83: 990-996.
- Bañuelos R., J. J. 2009. Perfil lipídico del huevo de gallina en respuesta a la suplementación con cobre. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. México. 148 p.
- Cheng, C. Y., and M. Hsu. 1997. Effect of dietary organic chromium on egg yolk cholesterol level. *In: Memoriam of 14<sup>th</sup> Annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry*. May 1997. Lexington K.Y. p. 44.
- Coordinación General de Ganadería. 2009. Situación actual y perspectivas de la producción de carne de porcino en México 2009. <http://www.sagarpa.gob.mx/ganaderia>. Consultada el 7 de noviembre de 2009.
- Cromwell, G. L., T. S. Stahly, and H. J. Monegue, D. D. Hall, and D. E. Orr, Jr. 1998. Tribasic copper chloride and copper sulphate as copper sources for weanling pigs. *Journal of Animal Science* 76: 118-123.
- Debasis, B., J. S. Sidney, W. D. Bernard, B. Manashi, and G. P. Harry. 2002. Cytotoxicity and oxidative mechanism of different forms of chromium. *Toxicology* 180: 5-22.
- Debski, B., J. Niemiec, and W. Zalewski. 1998. Chromium supplementation reduces egg cholesterol content. *In: Memoriam of 14th Annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry*. April 1998. Lexington K.Y. p. 46.

- Hendrix Genetics Company. 2008. Nutrition Management Guide. <http://www.isapoultry.com/template.php?sectionId=518>. Consultada el 11 de septiembre de 2008.
- Idowu, O. M. O., T. F. Laniyan, O. A. Kuye, V. O. Oladele-Ojo, and D. Eruvbetine. 2006. Effect of copper salts on performance, cholesterol, residues in liver, eggs and excreta of laying hens. *Archivos de Zootecnia*. 55(212): 327-338.
- Jensen, L. S., and D. V. Maurice. 1980. Dietary chromium and interior egg quality. *Poultry Science* 59: 341-346.
- Króliczewska, B., W. Zawadzki, T. Skiba, and D. Mista. 2005. Effects of chromium on chicken broilers growth and carcass characteristics. *Acta Veterinaria Brunensis* 74: 543-549.
- Lien, T. F., K. L. Chen, C. P. Wu, and J. J. Lu. 2004. Effects of supplemental copper and chromium on the serum and egg traits of laying hens. *British Poultry Science* 4: 535-539.
- Linder, M. C. 2002. Biochemistry and molecular biology of copper in mammals *In: Handbook of Copper Pharmacology and Toxicology*, E. J. Massaro, ed. Totowa, NJ: Humana Press. pp: 3-32.
- Liu, Z., M. M. Bryant, and D. A. Roland, Sr. 2005. Layer performance and phytase retention as influenced by copper sulphate pentahydrate and tribasic copper chloride. *Journal of Applied Poultry Research*. 14: 499-505.
- Mabe, I., C. Rapp, M. M. Bain, and Y. Nyss. 2003. Supplementation of a corn soybean meal diet with manganese, copper, and zinc from organic or inorganic sources improves eggshell quality in aged laying hens. *Poultry Science* 82: 1903-1913.
- NAS (National Academy of Sciences). 1997. *The Role of Chromium in Animal Nutrition*. National Academy Press. Washington, D. C. 93 p.
- NRC (National Research Council) 1994. *Nutrient Requirements of Poultry*. 9th Revised Edition. National Academy Press. Washington, D.C. USA. 155 p.
- Oba, A., S. P. Alves, A. S. H. Borba, L. M. Kodawara, E. A. Norkus, and A. A. Cerqueira. 2005. Production characteristics and cholesterol levels in blood and eggs from laying hens fed with diets supplemented with vegetable ash, copper, chromium and probiotic. *Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias* 100: 205-210.
- Paik, I. 2001. Application of chelated minerals in animal production. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 14: 191-198.

- Pechova, A., and L. Pavlata. 2007. Chromium as an essential nutrient: a review. *Veterinari Medicina* 1: 1-18.
- Pesti, G. M., and R. I. Bakalli. 1996. Studies on the feeding of cupric sulfate pentahydrate and cupric citrate to broiler chickens. *Poultry Sciences* 75: 1086-1091.
- Pesti, G. M., and R. I. Bakalli. 1998. Studies on the effect of feeding cupric sulphate pentahydrate to laying hens on egg cholesterol content. *Poultry Science* 77: 1540-1545.
- Piva, A., E. Meola, P. P. Gatta, G. Biagi, G. Castellani, A. L. Mordenti, J. B. Luchansky, S. Silva, and A. Mordenti. 2003. The effect of dietary supplementation with trivalent chromium on production performance of laying hens and the chromium content in the yolk. *Animal Feed Sciences and Technology* 106: 149-163.
- Sahin, K., M. Onderci, N. Sahin, and S. Aydin. 2002. Effects of dietary chromium picolinate and ascorbic acid supplementation on egg production, egg quality and some serum metabolites of laying hens reared under a low ambient temperature (6 °C). *Archives of Animal Nutrition* 56: 41-49.
- Şahin, K., O. Küçük, N. Şahin, and O. Ozbey. 2001. Effects of dietary chromium picolinate supplementation on egg production, egg quality and serum concentrations of insulin, corticosterone, and some metabolites of Japanese quails. *Nutrition Research* 21: 1315-1321.
- Sahin, N., K. Sahin, M. Onderci, M. F. Gursu, G. Cikim, J. Vijaya, and O. Kucuk. 2005. Chromium picolinate, rather than the biotin, alleviates performance and metabolic parameters in heat-stressed quail. *British Poultry Science* 46(4): 457-463.
- SAS (Statistical Analysis System). 2004. SAS/STAT User's guide (Release 9.1). Cary, NC, USA. SAS Institute Inc.
- Uyanik, F., S. Kaya, A. H. Kolsuz, M. Eren, and N. Sahin. 2002. The effect of chromium supplementation on egg production, egg quality and some serum parameters in laying hens. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences* 26: 379-387.
- Viera, M., and C. M. Davis-McGibony. 2008. Isolation and characterization of low-molecular-weight-chromium-binding substance (LMWCr) from chicken liver. *Protein Journal* 27: 371-375.
- Vincent, J. B. 2000. The biochemistry of chromium. *The Journal of Nutrition* 130: 715-718.

Wong, H. K., and E. A. Engku Azahan. 2004. Egg fatty acid composition, nutrient intake, feed conversion efficiency and egg production of layers fed organic and inorganic chromium supplements *Journal of Tropical Agriculture and Food Sciences* 32(2): 235–244.