



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**  
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
GANADERÍA

**MODELO MATEMÁTICO PARA PREDECIR EL  
RENDIMIENTO DEL QUESO A PARTIR DE LA  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA DIETA**

ELÍAS CHÁVEZ DELGADILLO

**T E S I S**

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO  
2012

La presente tesis titulada: **Modelo matemático para predecir el rendimiento del queso a partir de la composición química de la dieta** realizada por el alumno: **Elias Chávez Delgadillo** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**GANADERÍA**

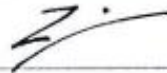
**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO



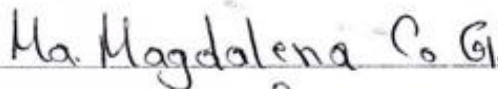
DR. DAVID HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

ASESOR



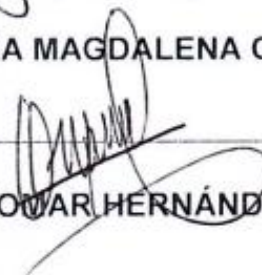
DR. LUIS MANUEL VARGAS VILLAMIL

ASESOR



DRA. MARÍA MAGDALENA CROSBY GALVÁN

ASESOR



DR. OMAR HERNÁNDEZ MENDO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, diciembre de 2012.

# MODELO MATEMÁTICO PARA PREDECIR EL RENDIMIENTO DEL QUESO A PARTIR DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA DIETA

Elías Chávez Delgadillo, MC.

Colegio de Postgraduados, 2012

## RESUMEN

Se elaboró un modelo matemático para predecir el rendimiento del queso usando como entradas el peso vivo del animal y la composición química de la dieta. Para el desarrollo del modelo se realizó un análisis sistemático de artículos del *Journal of Dairy Science* (1980-2011), se estableció una metodología para la selección de los artículos y la selección de variables para el modelo, con las cuales se realizaron seis regresiones lineales por mínimos cuadrados, para predecir el consumo de materia seca ( $R^2=62.5\%$ ), la producción de leche ( $R^2=90.6\%$ ), proteína ( $R^2=90.4\%$ ), grasa ( $R^2=83.5\%$ ), lactosa ( $R^2=94.8\%$ ) y caseína ( $R^2=100\%$ ); en cada regresión se verificó la existencia de una distribución normal en los residuales ( $P<0.05$ ; Anderson-Darling), con media cero y varianza constante. Asimismo, se validó cada ecuación usando nuevos datos y se calculó el error predicho promedio al cuadrado y el porcentaje de variabilidad que explica el modelo con los nuevos datos ( $R^2_{\text{predicción}}$ ). Para la predicción del rendimiento del queso se seleccionó la ecuación de Van Slyke y Publow, la cual también se validó con la  $R^2_{\text{predicción}}$ . Se concluye que, usando el modelo, el rendimiento del queso cheddar y la eficiencia alimenticia son sensibles a cambios en el contenido nutrimental de la dieta consumida por el animal.

**Palabras clave:** Modelo matemático, rendimiento del queso, producción de leche, composición química de la dieta.

# MATHEMATICAL MODEL FOR CHEESE YIELD PREDICTION USING NUTRITIONAL COMPOSITION OF THE DIET

Elías Chávez Delgadillo, MC.

Colegio de Postgraduados, 2012

## ABSTRACT

A mathematical model was developed to predict cheese yield using live animal weight and chemical composition of the diet as inputs. To build the model, a systematic analysis of data base from Journal of Dairy Science papers (between 1980-2011), was conducted. A methodology for selecting papers and variables for the model was established, in order to obtain six least squares linear regressions to predict dry matter intake ( $R^2=62.5\%$ ), milk production ( $R^2=90.6\%$ ), milk protein yield ( $R^2=90.4\%$ ), milk fat yield ( $R^2=83.5\%$ ), lactose yield ( $R^2=94.8\%$ ) and casein yield ( $R^2=100\%$ ). It was verified that the residuals of each linear regression were normally distributed ( $P$  value  $>0.05$ , with Anderson-Darling test), with mean equal to zero and constant variance. Finally, each equation was validated using new data and was calculated the average predicted squared errors and the percentage of variability that explains the model with new data ( $R^2_{\text{prediction}}$ ). To predict cheese yield the Van Slyke and Publow equation was used, which was also validated with the variability that explains the model with new data. Using the model, the cheese yield and feed efficiency are sensible to changes in chemical composition of the diet consumed by the animal.

**Key words:** Mathematical model, cheese yield, milk production, chemical composition of the diet.

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a:

A mis papas y mis hermanos, por ser mis ángeles de la guarda, mis maestros, mi bastón de ayuda, mis amigos, concejeros, psicólogos y las personas con mayor influencia en mi vida.

A Paola Loza, el gran amor de mi vida y el motivo detrás de mi sonrisa.

Al Dr. Miguel Angel Alvarez Avítia, mi médico oncólogo, que tuvo la destreza y el conocimiento para ayudarme a combatir el cáncer

Al Dr. David Hernández Sánchez, además de cumplir de forma magnífica su labor como consejero de mi tesis es una persona extraordinaria y un excelente amigo, que me brindó su ayuda y afecto en tiempos muy difíciles.

## **AGRADECIMIENTOS**

A los doctores Luis Manuel Vargas Villamil, María Magdalena Crosby Galván y Omar Hernández Mendo, por su valiosa ayuda académica y personal.

Al MC Salvador Medina Peralta y al MC Luis Colorado Martínez por su apoyo en el trabajo durante mi visita a Tabasco.

A la Línea Prioritaria de Investigación 7, Inocuidad, Calidad de Alimentos y Bioseguridad, y a la Línea Prioritaria de Investigación 11, Sistemas de Producción Agrícola, Pecuaria, Forestal, Acuícola y Pesquera del Colegio de Postgraduados, por su apoyo para realizar esta investigación

Al CONACYT, por darme la oportunidad de estudiar la maestría y apoyarme económicamente durante dos años.

A todos ellos muchas gracias, estoy seguro que sin su apoyo no hubiera sido posible terminar la tesis.

# CONTENIDO

	Página
I. Introducción .....	1
II. Objetivos.....	2
2.1 Objetivo general .....	2
2.2 Objetivos particulares.....	2
III. hipótesis .....	2
IV. Revisión de literatura.....	3
4.1 Situación actual de la producción de leche en México.....	3
4.2 Revisión sistemática en la investigación científica .....	4
4.3 Uso de modelos matemáticos en la nutrición animal .....	5
4.4 Diseño de experimentos de Taguchi.....	6
4.5 Regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados.....	7
4.6 Técnicas de validación de modelos .....	9
4.7 Alimentos y alimentación de ganado lechero .....	11
4.7.1 Consumo voluntario de alimento .....	11
4.7.2 Energía.....	11
4.7.3 Lípidos.....	13
4.7.4 Carbohidratos.....	14
4.7.5 Proteínas.....	16
4.7.6 Minerales.....	18
4.8 Coagulación enzimática de la leche y nutrición animal .....	19
4.9 Ecuaciones para predecir el rendimiento del queso.....	20
4.10 Análisis de sensibilidad de un modelo matemático .....	22
5. Materiales y métodos.....	23
5.1 Criterios de selección de artículos .....	23
5.2 Síntesis sistemática de los datos de los artículos .....	25
5.3 Criterios de selección de variables.....	27

5.4	Selección de arreglo ortogonal de Taguchi .....	28
5.5	Elaboración del modelo matemático .....	28
5.6	Validación del modelo .....	29
5.7	Evaluación del comportamiento del sistema .....	31
5.8	Aspectos innovadores del modelo completo .....	31
6.	Resultados y Discusión .....	33
6.1	Artículos seleccionados .....	33
6.2	Variables seleccionadas para el modelo .....	34
6.3	Análisis de los datos de los artículos .....	36
6.3.1	Consumo de materia seca .....	36
6.3.2	Consumo de energía .....	39
6.3.3	Consumo de grasa.....	44
6.3.4	Consumo de carbohidratos.....	48
6.3.5	Consumo de proteína .....	53
6.3.6	Consumo de minerales .....	57
6.4	Elaboración de regresiones lineales .....	59
6.4.1	Predicción de la producción de leche.....	62
6.4.2	Predicción de la producción de proteína en la leche .....	67
6.4.3	Predicción de la producción de grasa de leche .....	72
6.4.4	Predicción de la producción de lactosa en la leche .....	77
6.4.5	Predicción de la producción de caseína en la leche.....	82
6.4.6	Predicción del rendimiento del queso.....	86
6.4.7	Predicción del consumo de materia seca.....	87
6.5	Modelo completo.....	92
6.5.1	Evaluación del comportamiento del sistema del modelo elaborado .....	95
7.	Conclusiones .....	97
8.	Recomendaciones .....	98
9.	Literatura citada.....	99



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Arreglos Ortogonales de Taguchi .....	6
Cuadro 2. Factores y niveles para selección de variables .....	27
Cuadro 3. Valores utilizados para el análisis de sensibilidad .....	31
Cuadro 4. Artículos seleccionados .....	33
Cuadro 5. Características generales de los artículos seleccionados .....	34
Cuadro 6. Arreglo ortogonal para la selección de variables .....	35
Cuadro 7. Medias por subgrupo para la selección de variables .....	36
Cuadro 8. Consumo de materia seca promedio, máximo y mínimo .....	39
Cuadro 9. Consumo de energía neta de lactancia (ENL, Mcal PV-0.75) promedio, .....	41
Cuadro 10. Coeficiente de correlación de Pearson para la relación entre el consumo de energía y la producción de leche, contenido de proteína, caseína, lactosa y grasa .....	42
Cuadro 11. Consumo de grasa promedio, máximo y mínimo .....	45
Cuadro 12. Consumo de carbohidratos no fibrosos (CNF) promedio, máximo y mínimo .....	49
Cuadro 13. Consumo de fibra detergente neutro (FDN) promedio, máximo y mínimo .	50
Cuadro 14. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de carbohidratos y la producción leche, lactosa, caseína, proteína y grasa .....	52
Cuadro 15. Consumo de proteína cruda (PC) promedio, máximo y mínimo .....	54
Cuadro 16. Consumo de calcio promedio, máximo y mínimo .....	58
Cuadro 17. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de macrominerales y la producción de leche, y su contenido de proteína y grasa .....	59
Cuadro 18. Coeficientes de regresión para la predicción de la producción de leche ....	63
Cuadro 19. Análisis de varianza para la predicción de leche .....	63
Cuadro 20. Coeficientes de regresión para la predicción de la proteína de leche .....	68
Cuadro 21. Análisis de varianza de la predicción de la proteína de leche .....	68
Cuadro 22. Coeficientes de regresión para la predicción de grasa de leche .....	73
Cuadro 23. Análisis de varianza para la predicción de grasa de leche .....	73
Cuadro 24. Coeficientes de regresión para la predicción de lactosa .....	78

Cuadro 25. Análisis de varianza para la predicción de lactosa .....	78
Cuadro 26. Coeficientes de regresión para la predicción de caseína .....	83
Cuadro 27. Análisis de varianza para la predicción de caseína .....	83
Cuadro 28. Coeficiente de regresión para la predicción del consumo de materia seca	88
Cuadro 29. Análisis de varianza para la predicción del consumo de materia seca .....	88
Cuadro 30. Resumen de fórmulas del modelo desarrollado completo .....	93
Cuadro 31. Pasos a seguir para la obtención del rendimiento del queso usando el modelo desarrollado completo .....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Valor económico de la producción de leche en México. ....	3
Figura 2. Producción anual de leche en México.....	4
Figura 3. Tipos de energía de un alimento.....	12
Figura 4. Criterios de selección de artículos .....	24
Figura 5. Síntesis sistemática de los datos de los artículos .....	25
Figura 6. Esquema del modelo matemático para predecir el rendimiento del queso a partir de los datos nutrimentales de la dieta. ....	29
Figura 7. Coeficiente de correlación de Pearson para la relación entre el consumo de materia seca y la producción de leche, proteína, grasa y caseína. ....	37
Figura 8. Dispersión de la relación entre el consumo y la producción de leche .....	37
Figura 9. Diagrama de caja para la relación entre la producción de leche y el consumo sobre peso metabólico (C/PV0.75).....	38
Figura 10. Relación entre el consumo de energía y la producción de leche, proteína de leche, lactosa y grasa.....	43
Figura 11. Diagrama de caja entre el consumo de ENL y la producción de leche. ....	43
Figura 12. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de extracto etéreo y la producción de leche y su contenido de proteína y grasa.....	46
Figura 13. Relación entre el consumo de extracto etéreo y la producción de leche, contenido de proteína, grasa y lactosa.....	47
Figura 14. Diagrama de caja de la relación entre el consumo de extracto etéreo y la producción de leche. ....	48
Figura 15. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de carbohidratos y la producción leche, y su contenido de lactosa, caseína, proteína y grasa ..	51
Figura 16. Relación entre el consumo de fibra detergente neutro (FDN, g PV-0.75) y la producción de leche (kg d-1). ....	52
Figura 17. Relación entre el consumo de carbohidratos no fibrosos (CNF, g PV-0.75) y la producción de leche (kg d-1). ....	53
Figura 18. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de proteína y la producción de leche, y su contenido de proteína y grasa (PC: Proteína cruda, PIDN: Proteína insoluble en detergente neutro, PIDA: Proteína insoluble en	

detergente ácido, PNDR: Proteína no degradable en rumen, A, B, C: Fracciones de la proteína según la rapidez con la que se degrada en el rumen).....	55
Figura 19. Diagrama de caja de la relación entre el consumo de PC (g PV-0.75) y la producción de leche (kg d-1).....	55
Figura 20. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de aminoácidos esenciales de la proteína no degradable en rumen y la producción de leche, y su contenido de proteína y grasa .....	56
Figura 21. Modelo del proceso de producción de leche y su composición química. ....	60
Figura 22. Normalidad para el modelo de regresión de la predicción de cantidad de leche producida .....	64
Figura 23. Residuales para el modelo de regresión de la predicción de cantidad de leche producida.....	64
Figura 24. Dispersión de los residuales contra el orden de observación .....	65
Figura 25. Dispersión del número de animales por tratamiento contra los residuales estandarizados (SRES1).....	65
Figura 26. Dispersión de la leche producida (kg d-1) contra los residuales estandarizados (SRES1).....	65
Figura 27. Prueba del modelo con nuevos datos, diagrama de dispersión de la cantidad de leche observada en nuevos datos contra la cantidad de leche predicha en el modelo.....	67
Figura 28. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de proteína en la leche. ....	69
Figura 29. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de proteína en la leche. ....	69
Figura 30. Dispersión de los residuales del modelo de desarrollado para predecir la cantidad de proteína en la leche contra el orden de observación. ....	70
Figura 31. Dispersión del número de animales por tratamiento contra los residuales estandarizados .....	70
Figura 32. Dispersión de la cantidad de proteína producida contra los residuales estandarizados.....	71

Figura 33. Prueba del modelo, diagrama de dispersión de la cantidad de proteína en la leche observada en nuevos datos contra la cantidad de proteína en la leche predicha con el modelo. ....	72
Figura 34. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de grasa producida en la leche. ....	74
Figura 35. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de grasa producida en la leche. ....	75
Figura 36. Dispersión de los residuales del modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de grasa producida en la leche contra el orden de observación. ....	75
Figura 37. Dispersión del número de animales por tratamiento contra los residuales estandarizados en el modelo desarrollado. ....	76
Figura 38. Dispersión de la cantidad de grasa producida contra los residuales estandarizados en el modelo desarrollado. ....	76
Figura 39. Prueba del modelo, diagrama de dispersión de la cantidad de grasa producida en la leche observada en nuevos datos contra la cantidad de grasa en la leche predicha con el modelo. ....	77
Figura 40. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de lactosa en la leche. ....	79
Figura 41. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de lactosa en la leche. ....	79
Figura 42. Residuales del modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de lactosa en la leche contra el orden de observación. ....	80
Figura 43. Número de animales por tratamiento contra los residuales estandarizados para el modelo desarrollado para predecir la cantidad de lactosa en la leche. ....	80
Figura 44. Cantidad de lactosa producida en al leche contra los residuales estandarizados para el modelo desarrollado. ....	81
Figura 45. Prueba del modelo, diagrama de dispersión para predecir la cantidad de lactosa en leche observada con nuevos datos contra la cantidad de lactosa predicha con el modelo desarrollado. ....	82

Figura 46. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de caseína en leche.....	84
Figura 47. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de caseína en leche.....	84
Figura 48. Dispersión de los residuales del modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de caseína en leche contra el orden de observación. ..	85
Figura 49. Dispersión de la cantidad de caseína producida en leche observada contra el residual estandarizado del modelo desarrollado. ....	85
Figura 50. Prueba del modelo, diagrama de dispersión para la cantidad de caseína en leche observada en nuevos datos contra la cantidad de caseína predicha con el modelo desarrollado. ....	86
Figura 51. Prueba del modelo, diagrama de dispersión del rendimiento observado con nuevos datos contra el rendimiento predicho con el modelo desarrollado. .	86
Figura 52. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir el consumo de materia seca .....	89
Figura 53. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir el consumo de materia seca. ....	89
Figura 54. Diagrama de dispersión de los residuales del modelo de regresión desarrollado para predecir el consumo de materia seca contra el orden de observación. ....	90
Figura 55. Prueba del modelo, diagrama de dispersión del consumo observado en nuevos datos contra el consumo predicho con el modelo desarrollado. ....	91
Figura 56. Esquema del modelo matemático desarrollado para predecir el rendimiento del queso a partir de los datos nutrimentales de la dieta.....	92
Figura 57. Análisis de sensibilidad del modelo completo para el rendimiento del queso. ....	95
Figura 58. Análisis de sensibilidad usando el modelo completo para la eficiencia alimenticia .....	96

## ÍNDICE DE ECUACIONES

EC 1. Modelo de regresión múltiple. ....	7
EC 2. Notación matricial del modelo general de regresión lineal múltiple. ....	8
EC 3. Cálculo de coeficientes de regresión.....	8
EC 4. Suma de errores al cuadrado.....	9
EC 5. Error medio predicho.....	10
EC 6. Porcentaje de variabilidad que explica el modelo.....	10
EC 7. Cálculo de carbohidratos no fibrosos. ....	15
EC 8. Ecuación de Babcock para estimar el rendimiento del queso. ....	21
EC 9. Ecuación de Van Slyke y Publow para predecir el .....	21
EC 10. Adaptación de la ecuación de Van Slyke por Barbano para queso Mozzarella fresco.....	21
EC 11. Adaptación de la ecuación de Van Slyke por Ernstrom para queso Mozzarella bajo en humedad.....	21
EC 12. Cálculo de peso metabólico. ....	25
EC 13. Cálculo de consumo de nutrientes. ....	26
EC 14. .Cálculo de consumo de nutrientes sobre peso metabólico. ....	26
EC 15. Modelo de predicción para la producción de leche del NRC (2001) en ganado bovino. ....	30
EC 16. Cálculo de consumo de energía sobre peso metabólico.....	40
EC 17. Relación entre la producción de leche y el consumo de alimento. ....	60
EC 18. Ecuación general para las regresiones del Modelo.....	61
EC 17. Predicción de la producción de leche (versión factorizada) (S = 2.192, R-Sq = 90.6 %, R-Sq(adj) = 87.5 %). ....	61
EC 18. Predicción de la producción de proteína (versión factorizada)( S = 66.08, R-Sq = 90.4 %, R-Sq(adj) = 87.2 %). ....	61
EC 19. Predicción de la producción de grasa en la leche (versión factorizada) (S = 97.92, R-Sq = 83.5 %, R-Sq(adj) = 77.9 %). ....	61
EC 20. Predicción de producción de lactosa en la leche (versión factorizada)(S=80.91, R-Sq = 94.8 %, R-Sq(adj) = 91.4 %). ....	62

EC 21. Predicción de producción de caseína en la eche (versión factorizada)(S=1.381, R-Sq = 100.0 %, R-Sq(adj) = 100.0 %). .....	62
EC 22. Regresión lineal para la producción de leche por día.....	62
EC 24. Regresión lineal para la producción de proteína en la leche.....	67
EC 25. Regrsión lineal para estimar el contenido de grasa en la leche. ....	72
EC 26. Regresión lineal para predecir la producción de lactosa en la leche.....	77
EC 27. Regresión lineal para predecir la producción de caseína en al leche.....	82
EC 28. Regresión lineal para el consumo de materia seca.....	87
EC 29. Modelo de predicción del consumo de materia seca del NRC (2001) para ganado bovino productor de leche (CMS: consumo diario de materia seca, Leche: producción de leche al día, PV: Peso vivo).....	91



## I. INTRODUCCIÓN

El queso ha sido elaborado por diferentes culturas desde tiempos ancestrales, se define como el producto elaborado con la cuaja de leche obtenida por la coagulación de la caseína, dando lugar a diferentes variedades de quesos, catalogadas de acuerdo a su proceso como queso fresco, madurado o procesado. El queso fresco de vaca es elaborado a partir de leche de bovino y se caracteriza por su alto contenido de humedad, sabor suave, sin corteza y que requiere refrigeración (SSA, 1994). La cantidad de queso fresco que se puede producir está en función de la cantidad y calidad de la leche utilizada, donde la cualidad más importante de la leche que determina el rendimiento del queso es la capacidad de coagulación (Aleandri, 1989), la cual depende de la composición química de la leche, el tratamiento térmico previo a la elaboración y el uso de aditivos durante la elaboración del queso (Gösta, 1995).

El rendimiento normal en la elaboración de queso fresco varía entre 14 y 15.38 %, siendo la capacidad de coagulación de la leche la principal variable que marca la diferencia (MTPE, 2003). Está documentado que la alimentación del animal afecta la composición química de la leche y a su vez, esta influye en el rendimiento del queso fresco; sin embargo, no existen modelos que relacionen de forma directa, la alimentación del animal con el rendimiento del queso. El modelo matemático, planteado en la presente tesis, contribuye a predecir el rendimiento del queso fresco a partir de la alimentación del animal, lo que permitirá el balanceo de raciones con la intención de aumentar la producción de leche y el rendimiento del queso, a un menor costo de producción, buscando el valor agregado del producto.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Elaborar un modelo matemático que permita predecir el rendimiento de queso fresco a partir de las características nutrimentales de la dieta en ganado bovino usando para ello un análisis sistemático de datos derivados de artículos del Journal of Dairy Science.

### **2.2 Objetivos particulares**

- Elaborar una revisión sistemática de los datos reportados en artículos del Journal of Dairy Science, y estructurar una base de datos con la información obtenida.
- Identificar las variables explicativas que permitan obtener el coeficiente de determinación más alto para la predicción de producción de leche, usando para la selección de variables un arreglo ortogonal de Taguchi.
- Elaborar una regresión por mínimos cuadrados para predecir la producción de leche y su composición química.
- Utilizar la ecuación de Van Slyke para predecir el rendimiento del queso fresco utilizando las regresiones antes elaboradas.

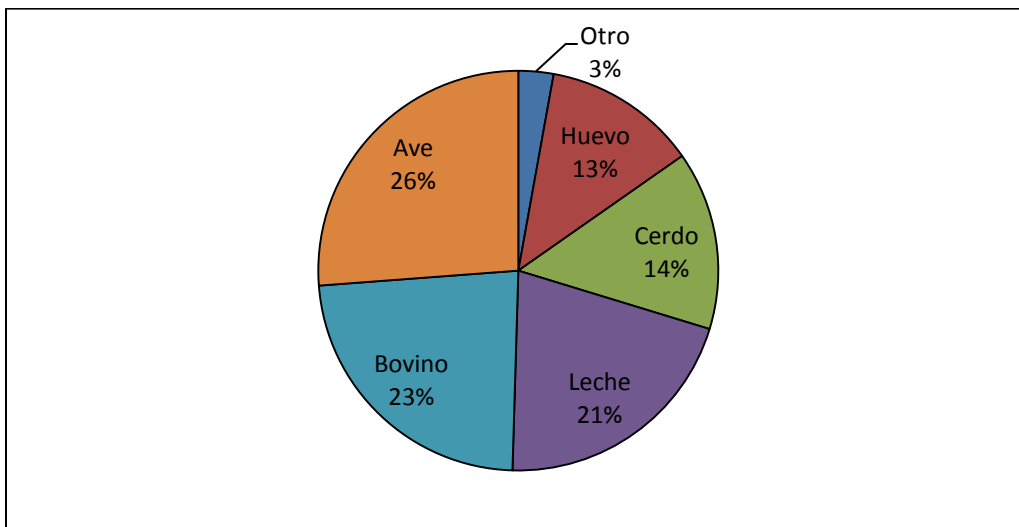
## **III. HIPÓTESIS**

La alimentación de una vaca en producción influye en el rendimiento del queso fresco derivado de su leche y puede predecirse el rendimiento si se conocen las características de la dieta.

## IV. REVISIÓN DE LITERATURA

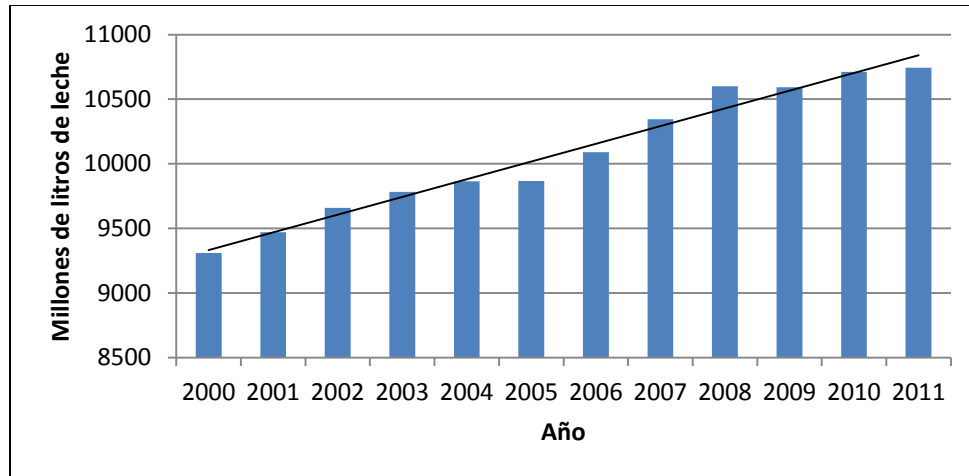
### 4.1 Situación actual de la producción de leche en México

De acuerdo a cifras reportadas por la Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC, 2012), la industria láctea en México es la tercera en importancia económica dentro de las actividades pecuarias, siendo su valor superior a la industria porcícola y del huevo; su valor económico se sitúa por encima de los 50 mil millones de pesos al año (Figura 1).



**Figura 1. Valor económico de la producción de leche en México.**

La industria de la producción de leche ha tenido un crecimiento importante en los últimos diez años, 13.4% de 2001 a 2011 (Figura 2), la producción nacional de leche es superior a los 10 mil millones de litros de leche al año, siendo Jalisco el estado mayor productor (1,984,872 miles de L año<sup>-1</sup>), pero la región de la Laguna, situada entre Coahuila y Durango, es la región más productora del país (2,133,158 miles de L año<sup>-1</sup>) (CANILEC, 2012)



**Figura 2. Producción anual de leche en México.**

#### **4.2 Revisión sistemática en la investigación científica**

La revisión sistemática consiste en la identificación, análisis y síntesis de evidencia cuantitativa de estudios previos, usando procedimientos organizados, transparentes y replicables en cada paso del proceso; permite acumular y correlacionar una gran cantidad de estudios independientes relacionados con un tema de investigación. Como en cualquier otro estudio, la revisión sistemática debe de contar con un protocolo o plan definido que describa los objetivos específicos de estudio, además cada paso y cada decisión debe estar bien documentada de tal manera que el lector pueda seguir y evaluar el método. En la revisión sistemática se deben tomar precauciones para minimizar el error, ya que de otra forma pueden acumularse y puede terminar en exagerar o subestimar algún efecto, lo que pudiera culminar en una mala conclusión (Littell, 2008).

### **4.3 Uso de modelos matemáticos en la nutrición animal**

Los modelos matemáticos son una herramienta valiosa en nutrición animal, se utilizan principalmente para predecir los requerimientos nutricionales del animal, digestión, tasa de pasaje del alimento, crecimiento microbiano en el rumen, etc., ayudando a tener una mejor toma de decisiones respecto al manejo y alimentación de los animales, reduciendo así los costos en la producción animal. Consisten en un conjunto de ecuaciones que describen un fenómeno particular y buscan integrar y utilizar el conocimiento existente sobre nutrición animal (Baldwin, 2000).

Los modelos matemáticos pueden catalogarse con base a sus características: dinámicos (incluyen la variable tiempo), estáticos (no incluyen tiempo), empíricos (utilizan observaciones directas relacionadas con el fenómeno), heurísticos (están basados en las explicaciones sobre las causas que dan lugar al fenómeno), determinísticos (se conoce el resultado y no hay incertidumbre), estocástico (no se conoce el resultado, sólo su probabilidad).

Los modelos matemáticos generalmente usados en nutrición animal son una combinación de empíricos y heurísticos, estáticos y estocásticos. Los modelos matemáticos más utilizados en nutrición de rumiantes son los elaborados por el Institut National Recherche Agronomique (INRA), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Agricultural and Food Research Council (AFRC), Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS) y National Research Council (NRC) (Tedeschi, 2005).

#### 4.4 Diseño de experimentos de Taguchi

El Dr Genichi Taguchi desarrolló una metodología para el diseño de experimentos, el cual es usado para reducir la cantidad total de tratamientos necesarios en un experimento factorial. El sistema de Taguchi se deriva de 18 arreglos ortogonales estándar (Cuadro 1), un arreglo ortogonal es una matriz de un diseño factorial fraccionado cuya característica principal es que la matriz es ortogonal y balanceada (Kai y El-Haik, 2009).

**Cuadro 1. Arreglos Ortogonales de Taguchi.**

Arreglo ortogonal	Número de pruebas	Máximo No. de factores	Máximo número de columnas a estos niveles			
			2	3	4	5
L4	4	3	3			
L8	8	7	7			
L9	9	4		4		
L12	12	11	11			
L16	16	15	15			
L17	16	5			5	
L18	18	8	1	7		
L25	25	6				6
L27	27	13		13		
L32	32	31	31			
L32	32	10	1		9	
L36	36	23	11	12		
L36	36	16	3	13		
L50	50	12	1			11
L54	54	26	1	25		
L64	64	63	63			
L64	64	21			21	
L81	81	40		40		

Kai y El-Haik, 2009.

Cada arreglo ortogonal cuenta con su tabla de interacciones y gráfica lineal descrita por Taguchi, en donde se detalla la conformación del arreglo y la interacción entre los factores, dicha conformación puede ser modificada para adecuarse a diferente número de factores y niveles de acuerdo a las necesidades del experimento usando una

transformación Dummy o uniendo columnas. La selección del arreglo ortogonal para un experimento factorial se hace de acuerdo a cuatro pasos:

1. Encontrar los grados de libertad del experimento a realizar.
2. Selección de un arreglo ortogonal estándar, los grados de libertad deben ser iguales o menores al número de pruebas del arreglo ortogonal.
3. Asignación de factores a las columnas del arreglo ortogonal, con base a la tabla de interacciones y la gráfica lineal del arreglo.
4. Modificación del arreglo, usando transformación Dummy o unión de columnas para adecuar el arreglo al número de niveles de los factores, dejar algunas columnas vacías si es que sobran.

(Kai y El-Haik, 2009)

#### **4.5 Regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados**

El modelo de regresión lineal por mínimos cuadrados fue propuesto por Carl Friedrich Gauss y por Adrien Marie Legendre, de forma separada, a principios del siglo XIX, y sus primeras aplicaciones fueron en el área de astronomía y geodesia, pero fue hasta mediados del mismo siglo cuando Sir Francis Galton desarrolló las técnicas modernas en ésta área en su libro *Hereditary genius - An enquiry into its laws and consequences* de 1869, en dónde buscaba entender los factores relacionados con la inteligencia humana (Bingham y Fry, 2010). El modelo de regresión lineal múltiple tiene el siguiente modelo general:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon_i \quad \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

(Bingham y Fry, 2010)

#### **EC 1. Modelo de regresión múltiple.**

Si lo escribimos en notación matricial queda de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1j} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{i1} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_i \end{bmatrix}$$

$$Y = X\hat{\beta} + \hat{\varepsilon} \text{ (Bingham y Fry, 2010)}$$

## EC 2. Notación matricial del modelo general de regresión lineal múltiple.

Donde  $y_i$  es la variable de repuestas,  $Y$  es el vector de la variable de respuesta,  $\beta_j$  son los coeficientes de regresión para cada  $x_{ij}$ ,  $\hat{\beta}$  es el vector de los coeficientes de regresión,  $x_{ij}$  son las variables utilizadas en el modelo,  $X$  es la matriz de las variables explicativas,  $\varepsilon_i$  es el error y  $\hat{\varepsilon}$  es el vector de los residuales.

Para el desarrollo del modelo se hacen los siguientes supuestos:

- $X$  es una matriz de rango completo
- Los errores son independientes
- Los errores tienen distribucional normal con media cero
- Los errores tienen varianza homogénea

En la regresión por mínimos cuadrados, como su nombre lo indica, se busca que los coeficientes de regresión hagan mínima la suma del cuadrado del error, para ello el estimador para el vector  $\hat{\beta}$  esta dado por

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y$$

(Rencher y Schaalje , 2008)

## EC 3. Cálculo de coeficientes de regresión.



Y el vector del cuadrado del error esta dado por:

$$\sum_{1}^i (e_i)^2 = \sum_{1}^i (y_i - \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)^2 = \hat{\epsilon}' \hat{\epsilon} = Y'Y - Y'X\hat{\beta}$$

(Rencher y Schaalje , 2008)

#### **EC 4. Suma de errores al cuadrado.**

#### **4.6 Técnicas de validación de modelos**

Para Validar un modelo de regresión lineal, la literatura recomienda tres clases de procedimientos (Montgomey *et al.*, 2000).

- Análisis de los coeficientes y valores predichos por el modelo
- División de los datos.
- Recolección de nuevos datos-Corridas de confirmación

El análisis de los coeficientes y valores predichos por el modelo de regresión consiste en estudiar si los coeficientes de regresión son estables y si son razonables sus signos y magnitudes, para ello se hace uso de la experiencia o la información teórica que pudiera aportar información sobre el tamaño relativo y dirección de los coeficientes de regresión.

Los coeficientes que tengan signos inesperados o valores absolutos muy grandes suelen indicar que el modelo es inadecuado o que fueron mal estimados los coeficientes. Los valores predichos también puede ser una medida de validez del modelo, los valores predichos no realistas indican que el modelo está mal planteado o que los coeficientes están mal estimados (Montgomey *et al.*, 2000).

La división de datos se utiliza cuando no es posible reunir nuevos datos para validar el modelo, en ese caso los datos con los que se disponen se dividen en dos, una parte para realizar la regresión (datos de estimación) y otra parte para estudiar la capacidad predictiva del modelo (datos de predicción). Por último, la recolección de nuevos datos es el método más eficaz para validar un modelo de regresión, consiste en utilizar nuevos datos y comparar en forma directa las predicciones del modelo con esos datos (Montgomey *et al.*, 2000).

La comparación se hace por dos vías, primero se compara el cuadrado medio de los residuales del modelo contra el error predicho promedio al cuadrado, es decir, el cuadrado medio de los residuales ( $MS_{res}$ ) debe ser similar al error predicho promedio al cuadrado, obtenido con los nuevos datos:

$$MS_{Res} \approx \frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}$$

#### **EC 5. Error medio predicho.**

La otra vía es la  $R^2$  del ajuste con mínimos cuadrados con el porcentaje de variabilidad que explica el modelo con los nuevos datos, es decir:

$$R_{modelo}^2 \approx R_{prediccion}^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}$$

#### **EC 6. Porcentaje de variabilidad que explica el modelo.**

## **4.7 Alimentos y alimentación de ganado lechero**

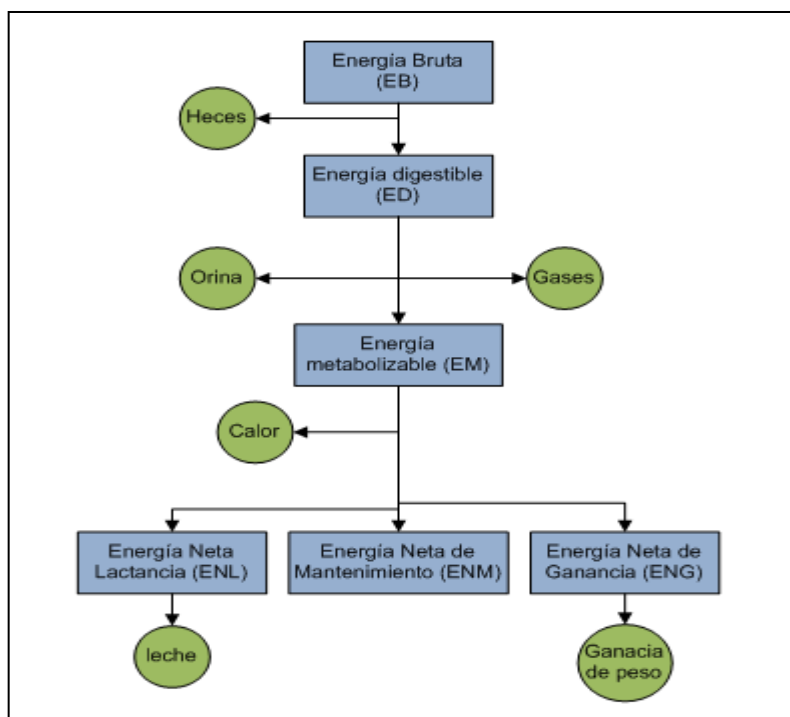
### **4.7.1 Consumo voluntario de alimento**

El consumo de materia seca determina la cantidad de nutrientes que están disponibles para la salud y producción de la vaca lechera, por ellos su importancia en la producción láctea. El consumo voluntario se refiere a la cantidad de alimento que ingiere un animal cuando dicho alimento se encuentra disponible a libre elección, está relacionado con las características del animal, tales como raza, estado fisiológico, actividad, salud y peso vivo, las condiciones ambientales, como humedad y temperatura, el manejo del animal, tal como frecuencia de alimentación y diseño del corral, y la alimentación, como digestibilidad, perfil nutrimental, forma física del alimento, palatabilidad, entre otros (NRC, 1987).

### **4.7.2 Energía**

Los procesos vitales requieren de moléculas que son consumidas como nutrientes y se descomponen para obtener energía, y constituyen también los bloques a partir de los cuales se sintetizan nuevas moléculas. Para mantener un estado estable, un organismo requiere suministro constante de energía del exterior, en este sentido, la energía no es un nutriente sino una propiedad de algunos nutrientes y es indispensable para la vida de los organismos (Campbell y Farrel, 2004).

La forma más común de medir la energía presente en un alimento es mediante las calorías por kilogramo de materia seca; una caloría se refiere al calor necesario para elevar la temperatura de 1 g de agua pura de 14.5°C a 15.5°C a nivel del mar. Para calcular las calorías de un alimento se utiliza una bomba calorimétrica, la cual incinera una muestra del alimento y mide el cambio de temperatura que genera el calor sobre el agua, a la energía del alimento medida con una bomba calorimétrica se le llama calor de combustión o energía bruta (EB) o energía ingerida (EI) en el caso de que un animal ingiera dicho alimento (Figura 3) (Church *et al.*, 2004).



**Figura 3. Tipos de energía de un alimento.**

Sin embargo, no toda la energía que se ingiere es metabolizada por el rumiante, parte de esta es excretada en forma de heces; la diferencia de la energía bruta de un alimento menos la energía bruta de las heces se le conoce como energía digestible (ED). También el rumiante excreta orina y gases, a la energía bruta del alimento menos la energía de las heces, de la orina y de los gases, se le conoce como energía metabolizable (EM) (Church *et al.*, 2004).

La energía metabolizable de una dieta está compuesta por la energía necesaria para mantener las funciones vitales del organismo, conocida como energía neta (EN) de mantenimiento (ENm), la energía que desprende el animal en forma de calor, a esto se le conoce como calor metabólico, y a la energía neta retenida por el animal, la cual puede usarse para crecer, energía neta de ganancia (ENg), para producir leche, energía neta de lactancia (ENl), etc. (Church, 1993).

### 4.7.3 Lípidos

Los lípidos son un grupo muy variado de sustancias solubles en éter, cloroformo y otros solventes orgánicos, pero insolubles en agua; se pueden clasificar en ácidos grasos, acilglicéridos, eicosanoides, fosfolípidos, esfingolípidos, lipoproteínas, derivados de terpenos, esteroides y ceras (Morrison y Neilson, 1998). Son una fuente concentrada de energía, se utilizan en la fabricación de alimentos para consumo animal para contener el polvo y aumentar el contenido energético de la dieta. Debido a su propiedad de ser solubles en éter, una forma de medir la grasa en los alimentos es mediante el extracto etéreo (EE), el cual también se conoce como grasa cruda o grasa bruta (Tejada, 1992).

En la alimentación animal se utilizan ácidos grasos de cadena larga, de origen vegetal o animal; cuando son de origen vegetal los ácidos grasos generalmente tienen insaturaciones, lo que les confiere un estado líquido a temperatura ambiente, mientras que las de origen animal, son generalmente ácidos grasos saturados, encontrándose en estado sólido a temperatura ambiente (Nelson y Cox, 2005).

Durante la digestión ruminal, los ácidos grasos insaturados sufren un proceso de hidrogenación natural en el rumen, dicho proceso es ocasionado por la liberación de iones de hidrógeno dentro del rumen, producido en la fermentación ruminal; los microorganismos del rumen también sintetizan cantidades considerables de lípidos que contienen algunos ácidos grasos poco usuales como los de cadena ramificada; sin embargo, la capacidad de los microorganismos del rumen de digerir los lípidos es limitada, cuando la cantidad de grasa en la dieta sobrepasa los  $100 \text{ g kg}^{-1}$ , la actividad microbiana se ve disminuida, la fermentación de carbohidratos se reduce y disminuye el consumo de materia seca (Ramírez, 2003).

#### 4.7.4 Carbohidratos

Los carbohidratos son aldehídos o cetonas polihidroxilados, están compuestos principalmente por carbono hidrógeno y oxígeno de la forma  $(CH_2O)_n$ ; con base al número de unidades de hidroxialdehídos o de hidroxicetonas los carbohidratos pueden catalogarse según el número de carbohidratos simples que contiene, monosacáridos (un carbohidrato simple), disacáridos (dos carbohidratos unidos), oligosacáridos (dos a diez carbohidratos unidos) y polisacáridos (más de diez carbohidratos unidos) (Morrison y Neilson, 1998).

La mayor parte de los carbohidratos encontrados en la naturaleza se presentan en forma de polisacáridos, y es común dividirlos en polisacáridos de reserva y polisacáridos estructurales. Los polisacáridos de reserva (o no estructurales), como su nombre lo indica, son utilizados por las células como reserva de energía, estos se depositan habitualmente en forma de grandes gránulos en el citoplasma celular, los más abundantes son el almidón en las plantas y el glucógeno en los animales (Campbell y Farrell, 2004).

Los polisacáridos estructurales sirven esencialmente de elementos estructurales en las paredes y en las cubiertas de las células, en los espacios intracelulares y en el tejido conjuntivo, en donde dan forma y confieren elasticidad o rigidez a los tejidos animales y vegetales, así como protección y soporte a las células, los más comunes en las plantas son la celulosa y la hemicelulosa. (Nelson y Cox, 2009)

En nutrición de ganado bovino los carbohidratos son la principal fuente de energía en las dietas, y como segunda pero importante función, mantienen en buena salud el tubo digestivo. Los carbohidratos de reserva o no estructurales son generalmente más digestibles que los estructurales, dado que los estructurales no pueden ser aprovechados por el rumiante de forma directa, estos deben ser primero digeridos por

las bacterias ruminales ya que el animal no posee las enzimas necesarias para degradarlos (Wattiaux y Armentano, 1995).

La forma más común de medir los carbohidratos estructurales es mediante la fibra detergente neutro (FDN), ésta mide la fracción de hemicelulosa, celulosa, lignina y sílice presente en un alimento, la lignina y el sílice no son carbohidratos, pero forman parte de la pared celular de las plantas y no pueden ser aprovechados por el animal. Para medir la fracción de carbohidratos de reserva o no estructurales es necesario algunos métodos enzimáticos, pero para facilitar el cálculo se realiza en vez del método analítico una aproximación, que se calcula a partir del análisis proximal del alimento utilizando el dato de fibra detergente neutro, a esta aproximación se le conoce como carbohidratos no fibrosos y su fórmula es la siguiente:

$$CNF = 100\% - \%FDN - \%PC - \%EE - \%Cenizas$$

(NRC, 2001)

### **EC 7. Cálculo de carbohidratos no fibrosos.**

Donde CNF es carbohidratos no fibrosos, FDN es fibra detergente neutro, PC es proteína cruda y EE es extracto etéreo.

Se sabe que cuando aumenta el contenido de fibra detergente neutro por arriba de 31.9% disminuye la ingesta de materia seca, disminuye la producción de leche, pero aumenta la eficiencia energética y aumenta el rendimiento de grasa de leche (Zebeli *et al.*, 2008).

#### 4.7.5 Proteínas

Las proteínas son el componente principal de los tejidos, la sangre, las enzimas, anticuerpos y muchas hormonas, desde el punto de vista químico son polímeros grandes, son poliamidas, y los monómeros de los cuales se derivan son ácidos  $\alpha$ -aminocarboxílicos y se les conoce como aminoácidos. De los 23 aminoácidos encontrados en las proteínas, tan sólo 10 son esenciales, es decir, el animal no puede producirlos como derivado de otros por lo que los tiene que ingerir (Morrison y Neilson, 1998). Con excepción de la glicina, los demás aminoácidos son quirales, es decir, sus imágenes especulares no son superponibles, por lo que tienen la capacidad de girar la luz polarizada a la derecha o a la izquierda, y se les denomina Dexter (D) o Laevus (L) respectivamente, dependiendo del lado al que giran la luz, todos los aminoácidos presentes en las proteínas pueden girar la luz polarizada a la izquierda por lo que son L (Nelson y Cox, 2009).

A la unión de aminoácidos para formar una cadena larga se le conoce como estructura primaria de la proteína, los aminoácidos se unen unos con otros para formar proteínas mediante el enlace peptídico, debido al acomodo de los aminoácidos se forman puentes de hidrógeno entre ellos, dando origen a la estructura conocida como estructura secundaria, por último al acomodo tridimensional de toda la molécula que involucra enlaces disulfuro se le conoce como estructura terciaria, a la pérdida de cualquiera de estas estructuras se le llama desnaturalización de proteínas (Campbell y Ferrel, 2004).

Los microorganismos del rumen degradan parte de las proteínas presentes en el alimento transformándolas en péptidos de cadena corta, aminoácidos libres, amoniaco, ácidos orgánicos y dióxido de carbono, con el fin de utilizar estos productos en la formación de biomasa o proteína microbiana; cabe señalar que la formación de proteína microbiana no necesariamente guarda la misma proporción de aminoácidos que la dieta suministrada al animal, los microorganismos del rumen tienen la capacidad



de desaminar los aminoácidos de la dieta y producir los aminoácidos que los necesitan para la formación de biomasa, la cual posteriormente pasa al abomaso junto con las proteínas del alimento no degradadas en el rumen iniciando su proceso de degradación de manera similar a como sucede en animales no rumiantes (Ramírez, 2003).

La cantidad de proteína que llega al intestino delgado para su absorción es la suma de la proteína sintetizada por los microorganismos y la proteína de la dieta que escapa a la degradación ruminal. El rumiante no es capaz de generar su propia proteína, es a través de la síntesis de proteína microbiana en el rumen, como el rumiante es capaz de utilizar nitrógeno no proteínico y transformarlo en proteínas con alto valor biológico (Church, 1993).

En el intestino la absorción de aminoácidos se lleva a cabo por transporte activo, el aminoácido atraviesa la membrana de la célula intestinal contra un gradiente de concentración, pudiendo haber inhibición de la absorción de aminoácidos por competencia con otros aminoácidos, por ejemplo, el exceso de arginina, cistina y ornitina inhiben la absorción de lisina, o una concentración alta de leucina aumenta el requerimiento de isoleucina (Church *et al.*, 2004).

La proteína bruta o proteína cruda es la forma más común de expresar el contenido de proteína de un alimento para consumo animal; ésta es sólo una aproximación de la cantidad de proteína presente en el alimento, se basa en medir el contenido de nitrógeno de un alimento mediante el método Kjeldahl y hace el supuesto que las proteínas del alimento contienen 16% de proteína, por lo cual sabiendo el contenido de nitrógeno del alimento es posible calcular el contenido de proteína del mismo (Tejada, 1992).

De forma general, la proteína bruta presente en el alimento está compuesta por proteína que se degrada en rumen para producir biomasa microbiana (proteína degradable en rumen) y por proteína que escapa la degradación ruminal entrando intacta al abomaso (proteína no degradable en rumen) , la cantidad de proteína no

degradable en rumen depende del consumo de alimento por parte del animal y de la dieta suministrada, ya que el porcentaje de proteína no degradable en rumen es diferente para cada tipo de alimento (Ramírez, 2003)

Existen dos fracciones importantes de la proteína cruda de un alimento, en el caso de los forrajes, es la proteína cruda insoluble en detergente neutro y la proteína cruda insoluble en detergente ácido; la primera generalmente es degradada en rumen para la producción de biomasa microbiana, en cambio la segunda, generalmente no se degrada en rumen ni en el intestino delgado, por lo que es defecada (NRC, 2001).

Los aminoácidos absorbidos en el intestino delgado, pasan al torrente sanguíneo y llegan a las células epiteliales mamarias para forman las proteínas de la leche; la principal proteína de la leche es la caseína, por lo que al suministrar dietas con un perfil de aminoácidos similar a la caseína, se esperaría que aumentara la producción de proteína de la leche, como lo sugieren Wright *et al.* (1998) y Clark (1974).

#### **4.7.6 Minerales**

En nutrición animal se conoce como minerales a todos los elementos inorgánicos, los cuales constituyen las cenizas que quedan después de una combustión, éstos son participantes activos en el metabolismo y fundamentales para la vida. Se dividen en dos grupos dependiendo de su requerimiento, macrominerales, los que deben de consumirse en mayor cantidad, y microminerales, los que deben de consumirse en menor cantidad o cantidades muy pequeñas (Church, 1993).

Los macrominerales son calcio (Ca), cloro (Cl), magnesio (Mg), fósforo (P), potasio (K), sodio (Na), y azufre (S). La mayor parte de los minerales se ingieren en los alimentos comunes de origen vegetal, pero su contenido varía dependiendo de la especie, las condiciones del suelo en el que fue cultivada la planta, la estación del año en la que crece, el estado de madurez al momento del corte, por lo que algunas veces

es necesario complementar los minerales de los alimentos con una premezcla mineral, que permita cumplir con el requerimiento de la vaca, sobre todo cuando existe una alta producción y no se sabe con certeza el contenido mineral de los alimentos (Underwood *et al.*, 1999). La continua ingestión de dietas deficientes, no balanceadas o excesivamente altas en algún mineral conlleva a cambios en la forma o concentración de los minerales en los tejidos y fluidos del cuerpo de los animales, lo que pudiera afectar la producción, crecimiento o fertilidad de los mismos (NRC, 2005)

#### **4.8 Coagulación enzimática de la leche y nutrición animal**

La caseína es un conjunto heterogéneo de proteínas presentes en la leche que tienen en común precipitar cuando se acidifica la leche a pH 4.6; se clasifican, de acuerdo a su movilidad electroforética en un campo eléctrico, en  $\alpha_{s1}$ -caseína,  $\alpha_{s2}$ -caseína,  $\beta$ -caseína y  $\kappa$ -caseína. Las diferentes caseínas forman partículas esféricas llamadas micelas, estas son un complejo coloidal en donde interacciones moleculares no covalentes con fosfato de calcio y entre si, mantienen unidas las diferentes caseínas dentro de la micela, dicho grupo de proteínas representan entre 76 y 86 % del total de la proteína de la leche (38 %  $\alpha_{s1}$ -caseína, 10 %  $\alpha_{s2}$ -caseína, 36 %  $\beta$ -caseína y 13 %  $\kappa$ -caseína, en promedio) (McMahon y Oommen, 2008).

La coagulación enzimática de la leche se refiere al efecto producido por el cuajo sobre la ésta, dicha reacción se divide en tres fases: proteólisis enzimática, agregación y gelatinización. El Cuajo es el nombre común con el que se le conoce al extracto del abomaso de terneros que contiene la enzima renina, la cual es responsable de la proteólisis enzimática durante la coagulación de la leche para la producción de queso, ésta tiene una máxima estabilidad a un pH de 5 a 6 (Mickelsen y Ernstrom, 1967), actualmente la renina puede ser obtenida por microorganismos modificados genéticamente con el gen que codifica para esta enzima, a este tipo de enzima se le conoce como renina recombinante.

La renina actúa rompiendo los enlaces Phe<sub>105</sub>- Met<sub>106</sub> de la *k*-caseína, dicha proteólisis origina un carbohidrato que contiene un macropéptido y para-*k*-caseína, en dicha reacción la constante de Michaelis ( $K_m$ ) se encuentra en un rango de 0.67 a  $5.4 \times 10^{-5}$ . El tiempo de coagulación (CT) es la suma del tiempo requerido para la proteólisis de la *k*-caseína y ocurre cuando al menos el 90 % de la *k*-caseína ha sufrido la proteólisis, es el momento en el que ocurre la fase de agregación y es proporcionalmente inverso a la actividad enzimática. Con la adición de la enzima, la viscosidad de la leche disminuye como consecuencia de la liberación de macropéptidos de las moléculas de *k*-caseína, dicha disminución de viscosidad no sólo se explica por la reducción del peso molecular de las partículas, sino también por la reducción del volumen y la forma de las micelas de caseína (Donald *et al.*, 1983).

La cantidad de caseína y grasa de la leche afectan su coagulación (Marziali y Ng-Kwasi-Han, 1986), y estos componentes dependen de la raza, estado de lactación y alimentación que se proporciona al animal (Emery, 1977). Diferentes estudios han señalado que se puede modificar la cantidad y composición de la grasa presente en la leche, con relativa facilidad, cambiando la proporción forraje:concentrado, la cantidad de fibra presente en la dieta y usando diferentes grasas como parte de la alimentación (Sutton, 1989); por otro lado, aumentar la cantidad de proteína o modificar su composición es más difícil de lograr. Wright *et al.* (1998) y Clark (1974) señalan que es posible hacerlo aumentando la proteína de sobrepeso en la dieta si dicha proteína tiene una composición similar a la de la caseína.

#### **4.9 Ecuaciones para predecir el rendimiento del queso**

Diferentes fórmulas para predecir el rendimiento del queso fresco se han utilizado desde hace más de 100 años, son utilizadas en la industria con fines de aseguramiento de calidad, para identificar si existió algún problema durante la elaboración del queso o planear una producción. La primera fórmula que se conoce fue la reportada por

Babcock en 1895, en ella se utiliza la proporción de grasa y caseína en la leche para predecir el rendimiento de queso fresco.

$$\text{Rendimiento del queso} = 1.1 * \%Grasa + 2.5 * \%Caseína$$

#### **EC 8. Ecuación de Babcock para estimar el rendimiento del queso.**

Una segunda fórmula, un poco más completa, es la reportada por Van Slyke y Publow en 1910, donde se incluye la humedad del queso como una variable para explicar el rendimiento del queso fresco, y específicamente la fórmula fue diseñada para queso cheddar.

$$\text{Rendimiento} = (0.93 * \%grasa + \%caseína - 0.1) * \frac{1.09}{[(100 - \%humedad)]/100}$$

#### **EC 9. Ecuación de Van Slyke y Publow para predecir el rendimiento del queso.**

La fórmula de Van Slyke ha sido adaptada a diferentes clases de quesos como el Mozzarella fresco (Barbano, 1984) y el Mozzarella bajo en humedad (Ernstrom *et al.*, 1981).

$$\text{Rendimiento} = (0.86 * \%grasa + \%caseína - 0.36) * \frac{1.22}{1 - \% \frac{humedad}{100}}$$

#### **EC 10. Adaptación de la ecuación de Van Slyke por Barbano para queso Mozzarella fresco.**

$$\text{Rendimiento} = (0.85 * \%grasa + \%caseína - 0.1) * 1.13 / (1 - \%humedad/100)$$

#### **EC 11. Adaptación de la ecuación de Van Slyke por Ernstrom para queso Mozzarella bajo en humedad.**

#### **4.10 Análisis de sensibilidad de un modelo matemático**

El objetivo de un análisis de sensibilidad es el de evaluar la magnitud en que un parámetro de entrada puede afectar las salidas de un modelo, es decir, se pretende evaluar que tan sensible es un modelo respecto al cambio de uno de los parámetros de entrada. Este tipo de análisis se puede considerar un procedimiento para la formación de un proceso en el diseño de un modelo matemático (Ortega, 2006).

Para realizar el análisis de sensibilidad se pueden utilizar algunas técnicas entre las que destacan el diseño uno a la vez y diseño factorial. El diseño uno a la vez consiste en hacer variar un sólo parámetro del modelo, manteniendo los otros constantes, se registra el cambio que sufre la variable de salida cuando cambia uno de los parámetros del modelo. El diseño factorial consiste en hacer variar varios parámetros al mismo tiempo de acuerdo a una matriz, de tal manera que se refleje un incremento en las variables explicativas, después se identifican las variables más significativas y se grafican (Ortega, 2006)

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

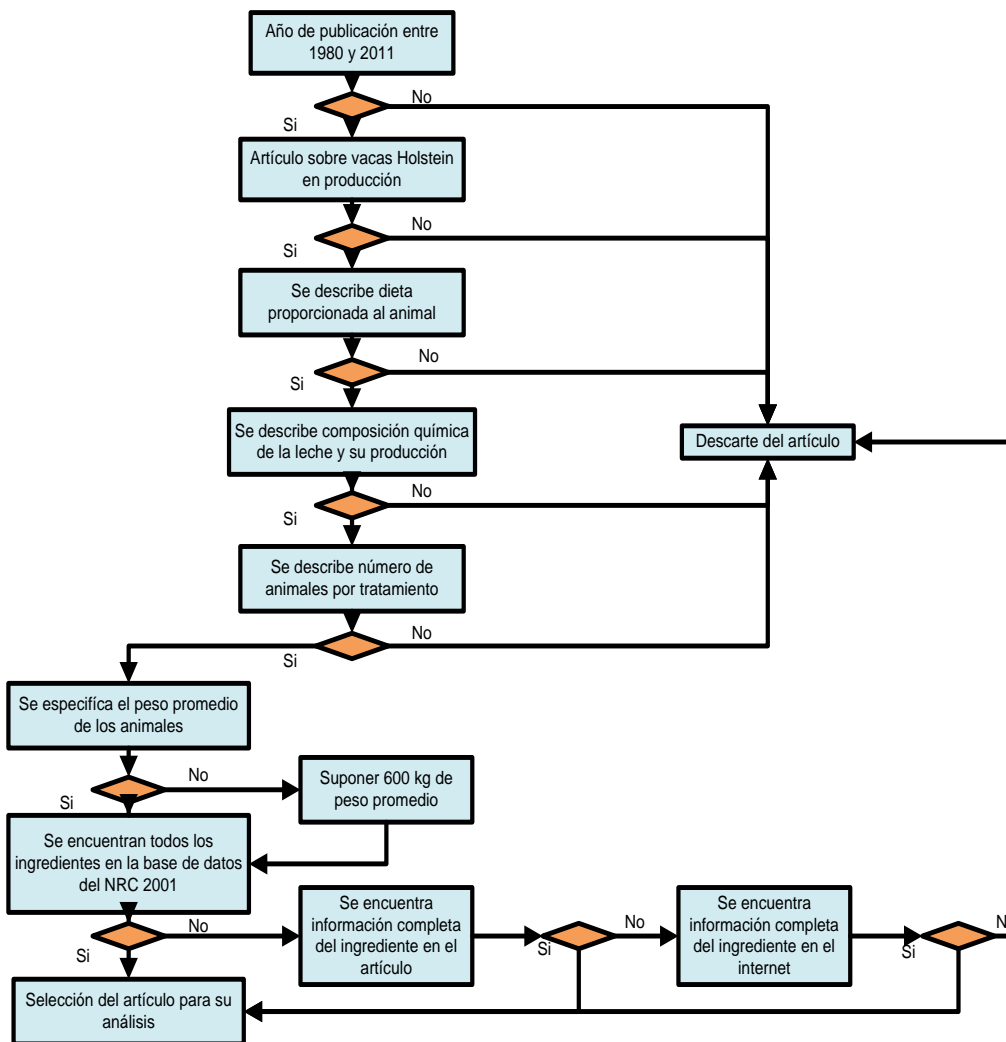
Se elaboró un modelo matemático empírico, determinístico y estático de 10 ecuaciones para predecir la producción de leche en vacas Holsteín, la composición química de la misma y el rendimiento de queso que se obtendría al utilizar dicha leche, para lo cual se seleccionaron 25 artículos del Journal of Dairy Science de los cuales se obtuvieron 115 tratamientos, los cuales se analizaron mediante una síntesis sistemática; Con los datos obtenidos se seleccionaron las variables para el modelo y se realizaron las regresiones lineales por mínimos cuadrados que conforman al modelo matemático. Las ecuaciones del modelo elaborado fueron validadas usando 15 datos de artículos del Journal of Dairy Science, diferentes a los usados para elaborar el modelo.

### 5.1 Criterios de selección de artículos

Se seleccionaron artículos del Journal of Dairy Science (*JDS*) publicados entre los años 1980 y 2011; Para la búsqueda de los artículos se utilizaron las palabras clave milk AND production AND feed AND composition. De los artículos desplegados por el buscador, de la base de datos del JDS, se seleccionaron los artículos para su análisis usando el siguiente criterio de selección (Figura 4):

- El año de publicación (se seleccionaron únicamente artículos entre el año 1980 y 2011).
- La raza de los animales utilizados (se seleccionaron los artículos que utilizaron vacas Holstein en producción)
  - La alimentación del animal (fórmula con todos los ingredientes, puede o no tener detallada la premezcla de vitaminas y minerales traza, pero si debe detallar los macrominerales).
  - La composición química de la leche de cada tratamiento (porcentaje de proteína y grasa, pudiendo tener también el porcentaje de lactosa y caseína) y la cantidad promedio de leche producida por vaca en cada tratamiento (en kilogramos por día).

- La cantidad de animales utilizados en cada tratamiento.
  - El peso promedio de los animales utilizados en cada tratamiento (de no tenerlo se hizo el supuesto de un peso promedio de 600 kg).
  - No se utilizaron artículos en los que la finalidad del estudio era probar algún medicamento para evaluar su efecto en la producción de leche o la composición química de la misma.

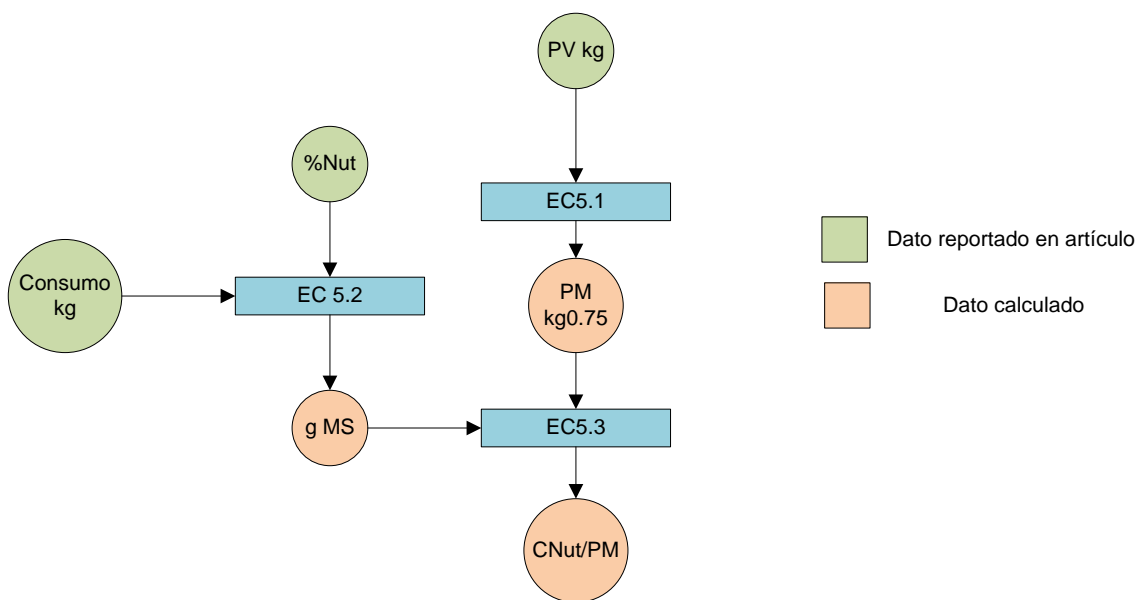


**Figura 4. Criterios de selección de artículos.**



## 5.2 Síntesis sistemática de los datos de los artículos

Con la información de la dieta obtenida de los artículos, se calcularon los nutrientes consumidos, sobre peso metabólico y con ellos se elaboró una base de datos (Figura 5). Se realizó un análisis de covarianza por el método de Pearson para cada nutriente con relación a la producción de leche, grasa de leche y proteína de leche. También se realizaron diagramas de dispersión en los que se visualiza la relación entre cada nutriente con cada variable de respuesta.



**Figura 5. Síntesis sistemática de los datos de los artículos.**

- Cálculo de peso metabólico (EC 12)

Debido a que las necesidades nutrimentales de los animales no guardan una relación lineal con su peso (Blaxter, 1986), se decidió utilizar el dato del peso metabólico en lugar del peso vivo del animal, usando la siguiente fórmula:

$$PM_{ij} = (PV_{ij})^{0.75} = kg^{0.75}$$

### EC 12. Cálculo de peso metabólico.

Donde  $PM_{ij}$  es el peso metabólico de los animales del tratamiento i del artículo j y  $PV_{ij}$  es el peso vivo promedio de los animales del tratamiento i del artículo j.

- Cálculo de consumo de materia seca de cada nutriente (EC13)

Con los datos del consumo de materia seca promedio de cada tratamiento y el perfil nutrimental de la dieta, se calculó el consumo de cada nutriente en cada tratamiento usando la siguiente fórmula.

$$CN_{kij} = (\%N_k)(C_{ij})$$

### **EC 13 .Cálculo de consumo de nutrientes.**

Donde  $CN_{kij}$  es el consumo de materia seca de cada nutriente,  $\% N_k$  es el porcentaje del nutriente en la dieta y  $C_{ij}$  es el consumo de materia seca.

- Cálculo de consumo de nutrientes sobre peso metabólico (EC14)

Con el dato del consumo de materia seca de cada nutriente y el peso metabólico, se calculó el consumo de cada nutriente o cualidad sobre el peso metabólico para cada tratamiento de cada artículo, usando la siguiente fórmula:

$$CN_k/PM_{ij} = \frac{(MS_{ij})(N_{kij})}{PM_{ij}} = g/kg^{0.75} \quad \text{ó} \quad kg/kg^{0.75} \quad \text{ó} \quad kcal/kg^{0.75}$$

### **EC 14 .Cálculo de consumo de nutrientes sobre peso metabólico.**

Donde  $CN_k /PM_{ij}$  es el consumo del nutriente k sobre el peso metabólico en el tratamiento i del artículo j,  $MS_{ij}$  es el consumo de materia seca promedio del tratamiento i del artículo j,  $N_{kij}$  es el porcentaje o proporción del nutriente k en la dieta.

### 5.3 Criterios de selección de variables

A los diferentes elementos presentes en la tabla de composición de los ingredientes del NRC 2001 se les agrupó en cuatro grupos:

- Grupo 1. Energía: Todas las variables medidas en unidades de energía (Mcal) (energía digestible, energía metabolizable, energía neta de lactancia, energía neta de ganancia, energía neta de mantenimiento).
- Grupo 2. Carbohidratos: Todas las variables que miden de forma directa o indirecta a los carbohidratos en la dieta, ya sean fibrosos o no fibrosos (carbohidratos no fibrosos, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, hemicelulosa, celulosa).
- Grupo 3. Proteínas: Todas las variables que miden de forma directa las proteínas y aminoácidos (aminoácidos, proteína cruda, proteína insoluble en detergente neutro, proteína insoluble en detergente ácido, fracciones A, B y C de la proteína según su degradabilidad en rumen, proteína no degradable en rumen, proteína no degradable en rumen digestible en intestino).
- Grupo 4. Minerales: Todas las variables que miden de forma directa o indirecta los minerales en la dieta (cenizas, macrominerales).

En cada grupo se formaron subgrupos con las variables que por sí solas o sumándolas entre las del subgrupo pueden representar de forma completa al grupo sin que se repita alguna fracción de ellas (Cuadro 2).

**Cuadro 2 Factores y niveles para selección de variables**

Niveles (Sub-G)	Factores (Grupos)			
	Proteína	Energía	Carbohidratos	Minerales
1	a1	b1	c1	d1
2	a2	b2	c2	d2
3	a3	b3	c3	d3
4	a4			
5	a5			
6	a6			

Cada grupo se tomó como un factor y cada subgrupo como un nivel, de tal manera que se obtuvieron cuatro factores, uno de seis niveles y tres de tres niveles, o  $6^1 \times 3^3$  (Cuadro 2), lo que da un total de 162 combinaciones posibles para el modelo, por lo que se decidió realizar un diseño ortogonal de Taguchi, donde cada prueba del arreglo significa un modelo para la predicción de producción de leche. A los modelos se les realizó una regresión por mínimos cuadrados para predecir la cantidad de leche que produce al día y seleccionar a las variables para el modelo final, con base al coeficiente de determinación o  $R^2$ .

#### **5.4 Selección de arreglo ortogonal de Taguchi**

Se calcularon los grados de libertad para el diseño experimental:

Fuente	GDL
Media general	1
Proteína	5
Energía	2
Carbohidratos	2
Minerales	2
Total	12

Con 12 grados de libertad, cuatro factores, tres de tres niveles y uno de seis niveles se decidió seleccionar el arreglo L(18) el cual representa un arreglo factorial  $2^1 \times 7^3$ , a dicho arreglo se le adecuó para ajustar el número de variables con la técnica de unión de columnas.

#### **5.5 Elaboración del modelo matemático**

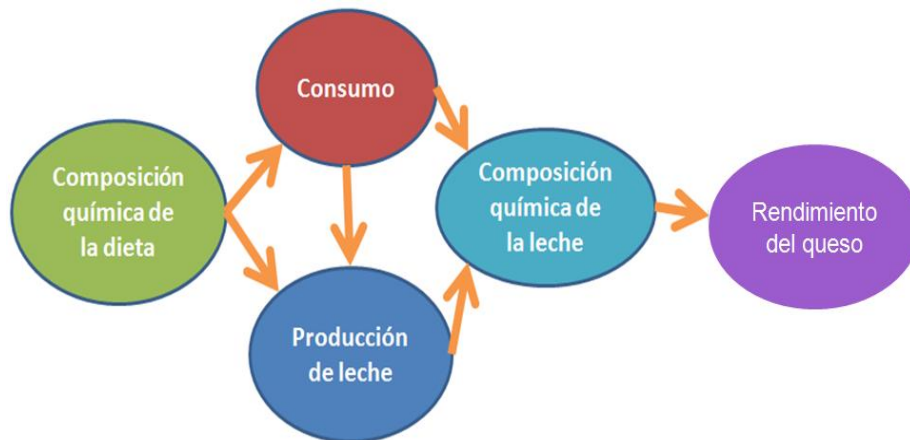
Se seleccionaron como variables explicativas a las que se obtuvieron coeficientes de determinación más altos, usando para el método de selección, un arreglo ortogonal de Taguchi. Para realizar las diferentes regresiones que conforman al modelo se usaron los datos de consumo sobre peso metabólico y se obtuvo su logaritmo natural;

con ellos se realizó una regresión lineal para cada variable de respuesta, por método de mínimos cuadrados, comprobándose los supuestos de la regresión línea: error con distribución normal, media cero y varianza homogénea (Petrie y Watson, 2006), con el siguiente modelo general:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon_i$$

(EC 1)

Donde  $Y_i$  es la variable de repuestas,  $\beta$  son los coeficientes de regresión para cada  $X$ ,  $X$  son las variables utilizadas en el modelo y  $\varepsilon_i$  es el error. Las regresiones se combinan en el modelo para poder predecir la capacidad de coagulación de la leche a partir de la composición química de la dieta (Figura 6).



**Figura 6. Esquema del modelo matemático para predecir el rendimiento del queso a partir de los datos nutrimentales de la dieta.**

## 5.6 Validación del modelo

Para la validación de las diferentes ecuaciones del modelo, se seleccionaron al azar datos de los artículos publicados en el Journal of Dairy Science entre 1980 y 2011, con los que no se realizó ninguna de las regresiones. Se procuró tener variedad de

ingredientes y diferentes producciones, se graficó un diagrama de dispersión de los valores obtenidos para la producción de leche y su contenido de proteína, grasa, lactosa y caseína, el consumo de materia seca y rendimiento del queso contra los valores predichos en los mismos rubros. Para cada ecuación se calculó el error de predicción promedio al cuadrado y se comparó con el cuadrado medio del error del modelo; además se comparó el coeficiente de determinación o  $R^2$  obtenido del modelo, contra el porcentaje de variabilidad que explica el modelo con los nuevos datos.

Los datos predichos fueron comparados contra los del modelo del NRC 2001 los cuales se obtuvieron con los datos reportados de la composición química de la leche, el consumo de alimento, el peso vivo y bajo el supuesto de cero gramos de aumento de peso diario, cero días de gestación, clima templado y animales estabulados en una explotación intensiva, usando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 & \text{Leche}(kg/d) \\
 & = \min \left[ \left( \frac{ENL_{\left(\frac{Mcal}{d}\right)} - 0.08(PV_{(kg)}^{0.75})}{0.0929 * \%Grasa\ láctea + 0.0547 * \%Proteína\ Láctea + 0.192} \right), \right. \\
 & \left. \left( \frac{PDI_{(g/d)} + PNR_{(g/d)}/0.64 - 4.1 * PV_{(kg)}^{0.5} - 0.3 * PV_{(kg/d)}^{0.6} - 30 * CMS_{(kg/d)} - 4.1 * PV_{(kg)}^{0.5}/0.64}{\%Proteína\ láctea * 10/0.67} \right) \right]
 \end{aligned}$$

### EC 15. Modelo de predicción para la producción de leche del NRC (2001) en ganado bovino.

Donde ENL es consumo diario de energía neta de lactancia, PV es peso vivo, PDI es consumo diario de proteína no degradable en rumen y digestible en intestino, PNR es consumo diario de proteína no degradable en rumen y CMS es consumo diario de materia seca.

## 5.7 Evaluación del comportamiento del sistema

Se realizó una evaluación del comportamiento del modelo completo con la técnica *uno a la vez*, para ello se utilizaron los valores promedio de cada variable de entrada y se varió el contenido de extracto etéreo, carbohidratos no fibrosos, hemicelulosa, proteína degradable en rumen y peso vivo del animal, con base al valor máximo y mínimo almacenado en la base de datos, haciendo la variación constante en 10 pruebas por variable.

**Cuadro 3. Valores utilizados para el análisis de sensibilidad.**

	Promedio	Máximo	Mínimo
ENL, Mcal kg <sup>-1</sup> MS	1.61	1.6	1.37
Extracto etéreo, %	4.2	6.0	3.0
Carbohidratos no fibrosos, %	40.9	44.0	36.0
Hemicelulosa, %	10.7	20.0	8.2
Proteína degradable en rumen, %	11.4	13.5	9.6

## 5.8 Aspectos innovadores del modelo completo

- Visión en el producto final

El modelo permite balancear una dieta para ganado lechero a un mínimo costo para obtener una cantidad de leche deseada y rendimiento deseado, por lo que el nutriólogo que use el modelo podrá balancear dietas con la intención de mejorar el rendimiento o modificar las características sensoriales del producto final, dándole así un valor agregado a la leche.

- Uso de consumo/peso metabólico

Para realizar las predicciones de la producción de leche y la composición química de la misma, se utilizaron datos del consumo diario de los nutrientes sobre el peso

metabólico del animal; usando dicha relación es posible disminuir la variación existente entre experimentos con dietas diferentes y animales con diferente peso.

- Estructura del modelo

El modelo se divide en cuatro partes principales:

- Predicción del consumo voluntario de materia seca
- Predicción de la producción de leche a partir de consumo de nutrientes sobre peso metabólico.
- Predicción de la composición química de la leche a partir del consumo de nutrientes sobre peso metabólico y producción de leche.
- Predicción del rendimiento del queso fresco a partir de composición química de la leche.



## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Artículos seleccionados

Se seleccionaron para su análisis 115 dietas de 24 artículos del Journal of Dairy Science, en los que se procuró tener variedad en ingredientes utilizados y en producciones de leche registradas (Cuadro 4), la cantidad de artículos y dietas seleccionadas es similar a la usada por el NRC 2001 para la evaluación de su modelo, donde seleccionaron 25 artículos del Journal of Dairy Science entre los años 1992 y 2000 de los que se seleccionaron 100 dietas diferentes.

**Cuadro 4. Artículos seleccionados**

Fuente	No. de dietas
Akayezu <i>et al.</i> , 1997.	8.00
Annexstad <i>et al.</i> , 1986.	4.00
Atwal y Erfle, 1991.	3.00
Atwal <i>et al.</i> , 1994.	4.00
Bertrand <i>et al.</i> , 1998.	3.00
Bowman <i>et al.</i> , 1987.	4.00
Brito y Broderick, 2007.	4.00
Broderick y Reynal, 2009.	4.00
Broderick <i>et al.</i> , 2009.	8.00
Broderick <i>et al.</i> , 2008.	8.00
Broderick <i>et al.</i> , 1993.	8.00
Canale <i>et al.</i> , 1989.	4.00
DePeters <i>et al.</i> , 1989.	4.00
DePeters <i>et al.</i> , 1984.	4.00
Feng <i>et al.</i> , 1993.	4.00
Hoffman <i>et al.</i> , 1991.	4.00
Leonardi <i>et al.</i> , 2005.	5.00
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00
Polan <i>et al.</i> , 1995.	6.00
Ruppert <i>et al.</i> , 2003.	6.00
Shabi <i>et al.</i> , 1998.	4.00
Tackett <i>et al.</i> , 1995.	4.00
Valaderes <i>et al.</i> , 1999.	4.00

Las producciones de leche reportadas fluctúan entre 20 y 47 kg d<sup>-1</sup>, y el número de animales utilizados para cada tratamiento varió de 4 a 24 animales, como se indica en el Cuadro 5.

**Cuadro 5. Características generales de la información en los artículos seleccionados.**

	Composición de la leche					Consumo kg MS d <sup>-1</sup>	Peso vivo kg	No. de Animales
	PC -----	Caseína	Lactosa % -----	Grasa	Leche kg d <sup>-1</sup>			
Promedio	3.1	2.3	4.8	3.4	34.9	22.1	603.1	10
DE	0.2	0.2	0.1	0.4	6.08	2.71	35.86	5
CV	7.0	8.7	2.9	11.7	17	12	6	53
Máximo	4.2	2.6	5.1	4.9	47.2	27.0	680.0	240
Mínimo	2.8	1.6	4.5	2.3	20.7	15.0	420.0	4.00

PC: Proteína cruda, MS: Materia seca, DE: Desviación estándar, CV: Coeficiente de variación.

## 6.2 Variables seleccionadas para el modelo

A los diferentes nutrientes y propiedades descritos en la tabla de composición de los alimentos descrita por el NRC (2001) se les separó en 5 grupos diferentes: proteínas y aminoácidos, energía, carbohidratos, minerales y extracto etéreo. A cada grupo se le dividió en sub grupos de tal manera que no existiera colinealidad entre las variables de cada sub grupo, es decir que no hubiera variables contenidas dentro de otras variables en el mismo subgrupo. Se realizó un diseño ortogonal de Taguchi L(18) (Cuadro 6) el cual fue modificado con la técnica de unión de columnas, para la asignación de columnas se tomó como factores a cada grupo y como niveles a cada subgrupo, cada renglón del diseño ortogonal de Taguchi representaba un modelo lineal con el que se realizó una regresión por mínimos cuadrados para predecir la cantidad de leche (kg d<sup>-1</sup>) que producen las vacas; a cada regresión se le calculó su coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y se seleccionaron las variables que de acuerdo a las medias por subgrupo, obtenían el coeficiente de determinación más alto; el arreglo ortogonal utilizado y los coeficientes de determinación obtenidos son los siguientes (Cuadro 6):

**Cuadro 6 Arreglo ortogonal para la selección de variables.**

	Factores					No. de modelo	R <sup>2</sup>
	Proteína	Energía	Carbohidratos	Minerales	EE		
Niveles	1	1	1	1	1	1	0.742
	1	2	2	2	1	2	0.833
	1	3	3	3	1	3	0.817
	2	1	1	2	1	4	0.82
	2	2	2	3	1	5	0.758
	2	3	3	1	1	6	0.828
	3	1	2	1	1	7	0.731
	3	2	3	2	1	8	0.845
	3	3	1	3	1	9	0.808
	4	1	3	3	1	10	0.771
	4	2	1	1	1	11	0.748
	4	3	2	2	1	12	0.847
	5	1	2	3	1	13	0.864
	5	2	3	1	1	14	0.849
	5	3	1	2	1	15	0.879
	6	1	3	2	1	16	0.812
	6	2	1	3	1	17	0.771
	6	3	2	1	1	18	0.812

EE: Extracto etéreo, R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación.

Al calcular las medias por subgrupo se escogió la combinación 6, 3, 3, 2 la cual corresponde a la proteína degradable en rumen, más todos los aminoácidos esenciales de la proteína no degradable en rumen, la energía neta de lactancia, los carbohidratos no fibrosos más la celulosa, hemicelulosa y lignina, los macrominerales y el extracto etéreo (Cuadro 7).

**Cuadro 7. Medias por subgrupo para la selección de variables.**

	Proteína	Energía	Carbohidratos	Minerales
1	0.797	0.79	0.79467	0.79
2	0.802	0.80	0.8075	0.84
3	0.795	0.83	0.82033	0.80
4	0.789			
5	0.864			
6	0.798			
Seleccionados	5	3	3	2

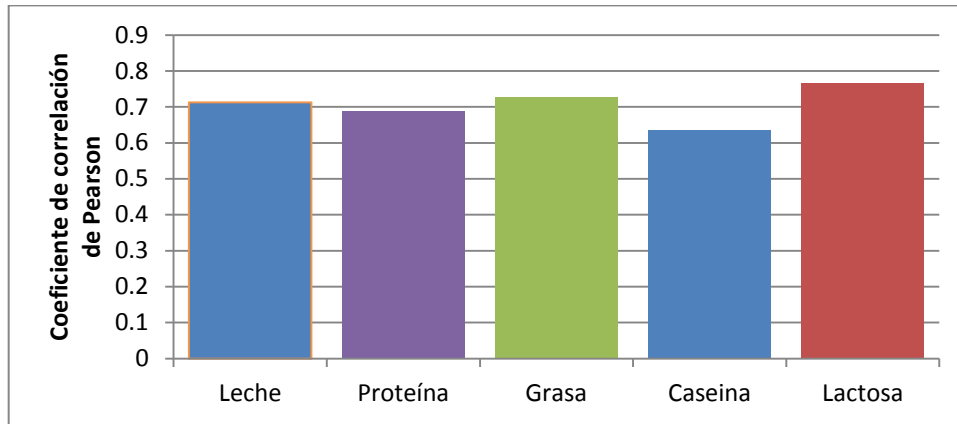
El NRC (2001) incorpora en sus ecuaciones para la predicción de la cantidad de leche a producir, el peso metabólico, el consumo de ENL, la proteína degradable en rumen, las cuales son algunas de las variables seleccionadas para el desarrollo del presente modelo; sin embargo, el NRC (2001) incluye la porción de la proteína no degradable en rumen pero digestible en intestino, mientras que este modelo incluye la cantidad de aminoácidos esenciales consumidos de la proteína no degradable en rumen, además este modelo incluye la cantidad de macrominerales, carbohidratos no fibrosos, celulosa, hemicelulosa y lignina consumidos con lo cual cubre de forma general los carbohidratos y minerales presentes en la dieta, mientras que el NRC (2001) no contempla el consumo de los diferentes carbohidratos ni los minerales en sus ecuaciones de predicción.

### **6.3 Análisis de los datos de los artículos**

#### **6.3.1 Consumo de materia seca**

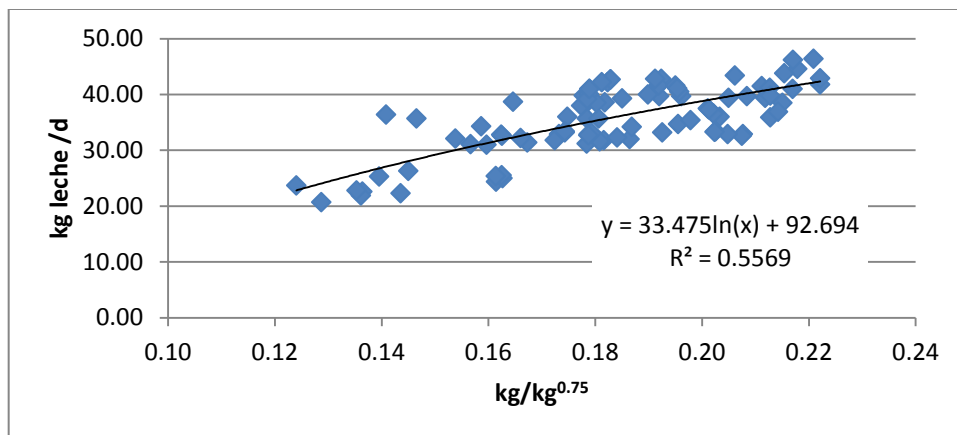
El consumo de materia seca determina la cantidad de nutrientes disponibles por el animal para mantener su salud y la producción de leche (NRC, 2001), los artículos seleccionados detallan el consumo diario promedio de cada tratamiento; además del peso vivo promedio de los animales, con dichos datos se obtuvo el consumo diario sobre el peso metabólico de los animales ( $\text{kg alimento PV}^{.75}$ ) (Cuadro 8), usando el consumo de alimento sobre peso metabólico se obtuvo el coeficiente de correlación de

Pearson del efecto del consumo sobre la producción de leche y su composición química (Figura 7).

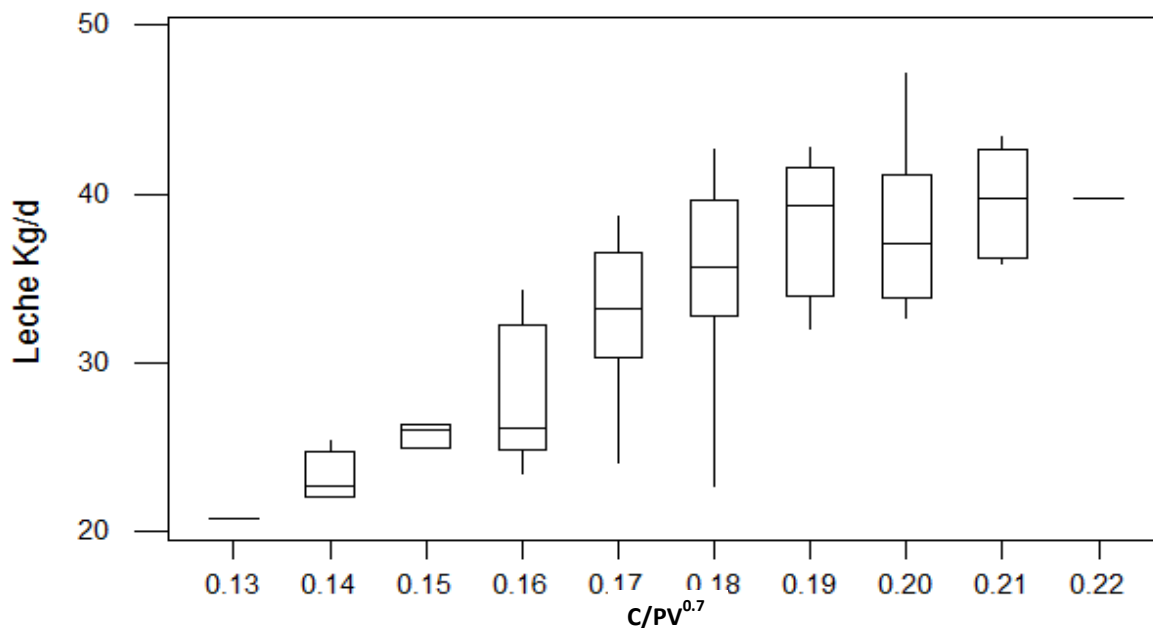


**Figura 7. Coeficiente de correlación de Pearson para la relación entre el consumo de materia seca y la producción de leche, proteína, grasa y caseína.**

Al obtener el coeficiente de correlación de Pearson se puede observar que existe una fuerte relación positiva entre el consumo de alimento, el peso metabólico del animal, la producción de leche y su composición química, la relación resulta lógica, pues el consumo de materia seca establece la cantidad de nutrientes disponibles para la producción de leche, dicha relación puede verse más clara en la Figura 8.



**Figura 8. Dispersión de la relación entre el consumo y la producción de leche.**



**Figura 9. Diagrama de caja para la relación entre la producción de leche y el consumo sobre peso metabólico ( $C/PV^{0.75}$ ).**

En la Figura 9 se puede observar que la cantidad de materia seca consumida es determinante en la producción de leche cuando el consumo es muy bajo (inferior a 0.15 kg  $PV^{-0.75}$ ) o cuando el consumo es alto (mayor a 0.19 kg  $PV^{-0.75}$ ), pero en un consumo medio la producción de leche no depende de esta variable, pues a un mismo nivel de consumo la variación es muy grande, lo cual concuerda con lo reportado por Guinard-Flament *et al.* (2007), en donde describe que la disminución en el consumo de materia seca por restricción del alimento reduce el flujo de sangre en la mama de la vaca, reduciendo así la cantidad de nutrientes disponibles por las células para la formación de leche.

**Cuadro 8 Consumo de materia seca<sup>¥</sup> promedio, máximo y mínimo.**

Fuente	Consumo promedio	Máximo	Mínimo
Akayezu <i>et al.</i> , 1997.	0.18	0.2	0.17
Annexstad <i>et al.</i> , 1986.	0.16	0.16	0.16
Atwal y Erfle, 1991.	0.16	0.17	0.16
Atwal <i>et al.</i> , 1994.	0.17	0.18	0.17
Bertrand <i>et al.</i> , 1998.	0.17	0.18	0.16
Bowman <i>et al.</i> , 1987.	0.18	0.18	0.17
Brito y Broderick, 2007.	0.2	0.2	0.18
Broderick y Reynal, 2009.	0.19	0.19	0.18
Broderick <i>et al.</i> , 2009.	0.2	0.21	0.19
Broderick <i>et al.</i> , 2008.	0.18	0.19	0.17
Broderick <i>et al.</i> , 1993.	0.2	0.21	0.2
Canale <i>et al.</i> , 1989.	0.2	0.2	0.2
DePeters <i>et al.</i> , 1989.	0.16	0.17	0.15
DePeters <i>et al.</i> , 1984.	0.16	0.16	0.16
Feng <i>et al.</i> , 1993.	0.14	0.14	0.13
Hoffman <i>et al.</i> , 1991.	0.18	0.18	0.18
Leonardi <i>et al.</i> , 2005.	0.2	0.2	0.2
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	0.18	0.19	0.18
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	0.18	0.19	0.18
Polan <i>et al.</i> , 1995.	0.19	0.2	0.17
Ruppert <i>et al.</i> , 2003.	0.19	0.2	0.18
Shabi <i>et al.</i> , 1998.	0.15	0.16	0.14
Tackett <i>et al.</i> , 1995.	0.19	0.2	0.18
Valaderes <i>et al.</i> , 1999.	0.2	0.22	0.18
Del total de los artículos	0.18	0.22	0.13

<sup>¥</sup> kg consumidos sobre peso metabólico (kg PV<sup>-0.75</sup>).

### 6.3.2 Consumo de energía

Para la estimación del valor energético de las dietas se utilizaron los datos de energía digestible, energía metabolizable, energía neta de lactancia, energía neta de mantenimiento y energía neta de ganancia reportados en las tablas de composición de alimentos del NRC (2001), usando la siguiente ecuación:

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{(\% \text{ en dieta})(\text{Consumo})(\text{Energía})}{(\text{Peso metabólico})}$$

### EC 16. Cálculo de consumo de energía sobre peso metabólico.

En dicha Ecuación, consumo se refiere a la ingesta diaria de alimento en base seca (kg d<sup>-1</sup>), % en dieta es la proporción de inclusión del alimento en la dieta, Energía es el valor de energía reportado en las tablas del NRC (Kcal kg<sup>-1</sup>) y Peso metabólico es el peso vivo promedio de los animales reportado en el artículo, elevado a la potencia de 0.75 (kg<sup>0.75</sup>). El consumo de materia seca y la concentración de energía en el alimento son variables que se relacionan con frecuencia con la producción de leche en los diferentes artículos, a medida que aumenta el consumo de energía, aumenta la producción de leche (Hristov *et al.*, 2005).

De forma general en los artículos seleccionados, se utilizaron dietas con un aporte de energía neta de lactancia de 0.21 Mcal PV<sup>-0.75</sup> hasta 0.36 Mcal PV<sup>-0.75</sup> (Cuadro 9). Para identificar el tipo de energía que está más relacionado con la producción de leche y su composición química, se evaluó el efecto de las diferentes formas de energía, reportadas en el NRC (2001), en la producción de leche y su composición química, se realizó una prueba de correlación de Pearson.

Al evaluar el coeficiente de correlación de Pearson (Cuadro 10) se pudo observar que la energía digestible es la que tiene una correlación más fuerte con la producción de proteína de la leche, caseína, lactosa y grasa de leche (R<sup>2</sup> = 0.774, 0.625, 0.857, 0.744, respectivamente)



**Cuadro 9. Consumo de energía neta de lactancia (ENL, Mcal PV<sup>-0.75</sup>) promedio, máxima y mínima.**

Fuente	No. Dietas	ENL Promedio	Máximo	Mínimo
Akayezu <i>et al.</i> , 1997.	8.00	0.31	0.34	0.29
Annexstad <i>et al.</i> , 1986.	4.00	0.27	0.27	0.27
Atwal y Erfle, 1991.	3.00	0.29	0.30	0.28
Atwal <i>et al.</i> , 1994.	4.00	0.28	0.28	0.28
Bertrand <i>et al.</i> , 1998.	3.00	0.29	0.31	0.29
Bowman <i>et al.</i> , 1987.	4.00	0.30	0.31	0.29
Brito y Broderick, 2007.	4.00	0.31	0.32	0.28
Broderick y Reynal, 2009.	4.00	0.31	0.32	0.30
Broderick <i>et al.</i> , 2009.	8.00	0.34	0.36	0.32
Broderick <i>et al.</i> , 2008.	8.00	0.31	0.33	0.29
Broderick <i>et al.</i> , 1993.	8.00	0.32	0.34	0.31
Canale <i>et al.</i> , 1989.	4.00	0.33	0.34	0.32
DePeters <i>et al.</i> , 1989.	4.00	0.24	0.26	0.22
DePeters <i>et al.</i> , 1984.	4.00	0.24	0.24	0.24
Feng <i>et al.</i> , 1993.	4.00	0.22	0.22	0.21
Hoffman <i>et al.</i> , 1991.	4.00	0.29	0.31	0.28
Leonardi <i>et al.</i> , 2005.	5.00	0.33	0.34	0.33
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	0.31	0.33	0.30
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	0.31	0.32	0.30
Polan <i>et al.</i> , 1995.	6.00	0.31	0.35	0.27
Ruppert <i>et al.</i> , 2003.	6.00	0.32	0.33	0.31
Shabi <i>et al.</i> , 1998.	4.00	0.25	0.27	0.24
Tackett <i>et al.</i> , 1995.	4.00	0.31	0.34	0.29
Valaderes <i>et al.</i> , 1999.	4.00	0.31	0.36	0.24
Del total de los artículos	115.00	0.30	0.36	0.21

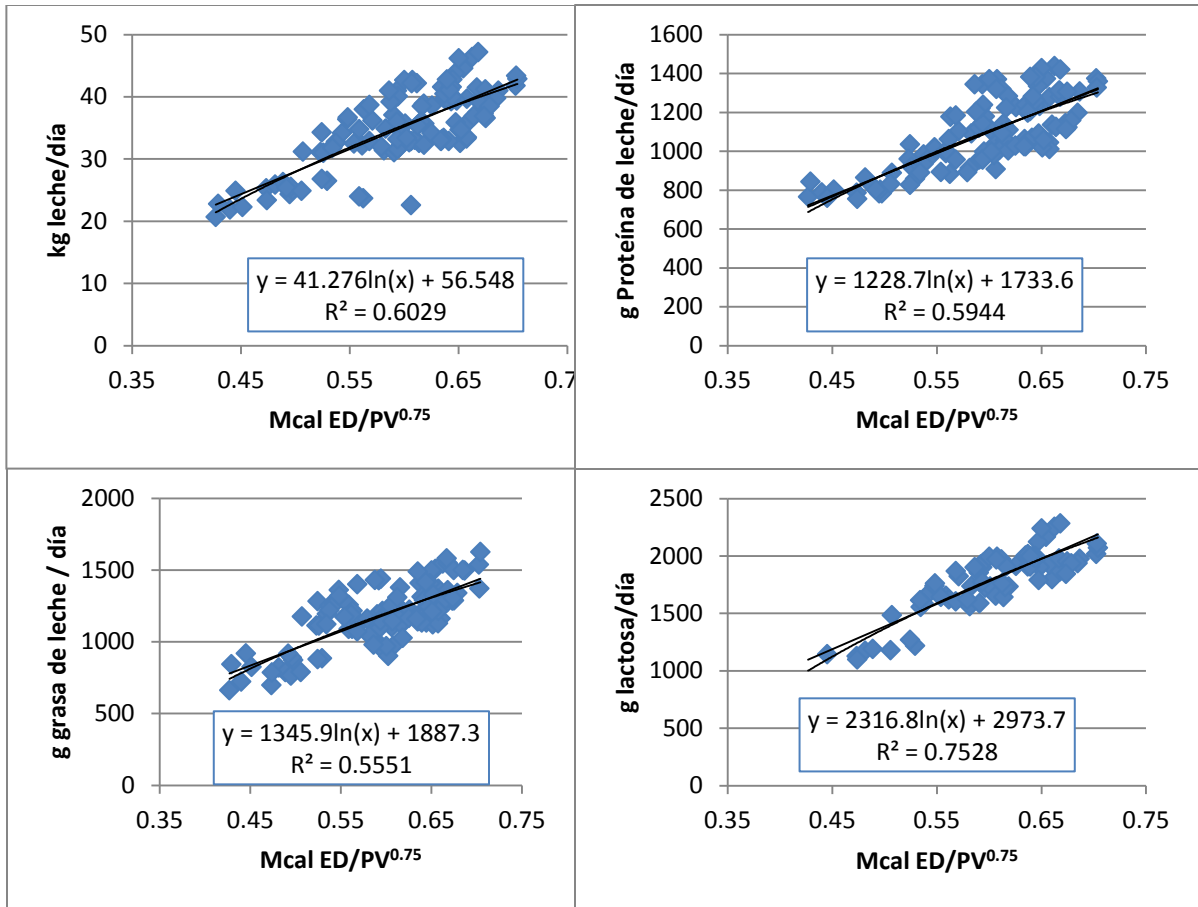
**Cuadro 10. Coeficiente de correlación de Pearson para la relación entre el consumo de energía y la producción de leche, contenido de proteína, caseína, lactosa y grasa.**

	Leche, kg	PC, g	Caseína, g	Lactosa, g	Grasa, g
ED	0.771	0.774	0.625	0.857	0.744
EM	0.765	0.766	0.597	0.854	0.73
ENL	0.764	0.769	0.605	0.852	0.726
ENM	0.741	0.744	0.554	0.84	0.709
ENG	0.686	0.714	0.489	0.782	0.62

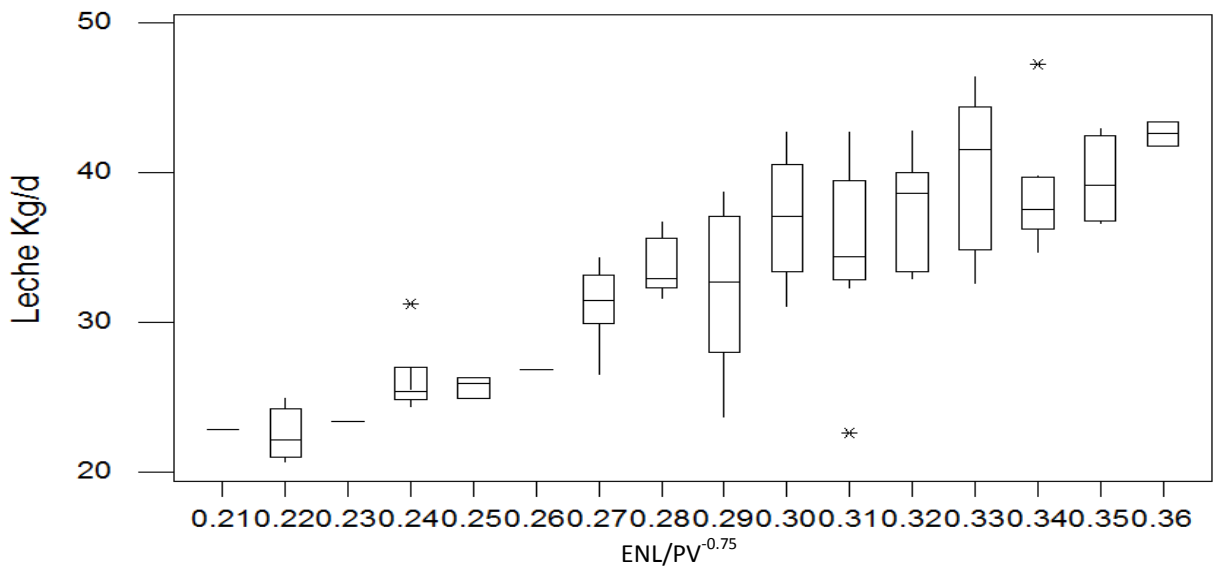
ED: energía digestible, EM: energía metabolizable, ENL: energía neta de lactancia, ENM: energía neta de mantenimiento, ENG: energía neta de ganancia.

Al realizar el diagrama de dispersión (Figura 10) de la relación entre la energía digestible y la producción de leche y proteína de la leche, grasa y lactosa, se muestra una tendencia positiva, a mayor energía consumida mayor es la producción de leche, pero parece tener un límite, es decir parece disminuir la pendiente cuando el consumo de energía es alto, lo cual concuerda con lo reportado por Moe *et al.* (1965), en donde se observó una disminución en los nutrientes digestibles totales de la dieta conforme aumentaba el aporte de energía por encima del requerimiento para el mantenimiento.

De manera similar que el consumo de materia seca, existe poca variación en los kilogramos de leche producidos cuando el consumo de energía es bajo o alto, pero la variación en la producción de leche es grande cuando el consumo de energía es superior a los  $0.29 \text{ Mcal PV}^{-0.75}$  e inferior a los  $0.33 \text{ Mcal PV}^{-0.75}$  (Figura 11), lo cual coincide con lo presentado por Reid *et al.* (1966) en donde señala que el requerimiento de energía aumenta conforme aumenta la producción de leche, lo que explicaría por qué la producción es baja cuando el aporte de energía es bajo, pues la energía es la limitante, y por qué aumenta conforme aumenta el aporte de energía.



**Figura 10. Relación entre el consumo de energía y la producción de leche, proteína de leche, lactosa y grasa.**



**Figura 11. Diagrama de caja entre el consumo de ENL y la producción de leche. (ENL: energía neta de lactancia, PM: peso metabólico)**

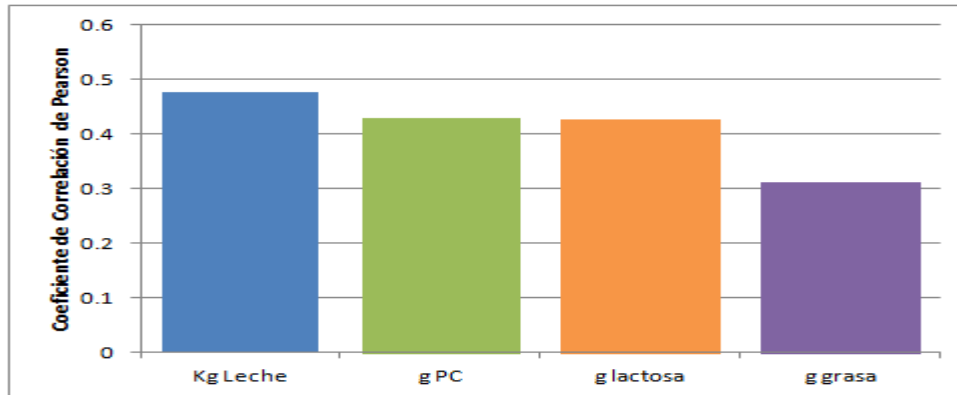
### 6.3.3 Consumo de grasa

La grasa es un alimento usado para incrementar la densidad energética de una dieta, además de que puede ser usada para mejorar la palatabilidad del concentrado y reducir su polvosidad (NRC, 2001). Se midió el consumo de grasa tomando como referencia la cantidad de extracto etéreo de la dieta obtenida por una suma ponderada usando la composición química de cada uno de los ingredientes en las diferentes dietas y el consumo de alimento reportado; a dicho dato se le dividió entre el peso metabólico para obtener el consumo de extracto etéreo con relación al peso metabólico. Los artículos seleccionados reportaron dietas con un consumo de grasa de 3.78 a 15 g PV<sup>0.75</sup> de extracto etéreo, con un promedio de 8.16 g PV<sup>0.75</sup> (Cuadro 11).

Se realizó una prueba de correlación de Pearson (Figura 12) y un diagrama de dispersión (Figura 13) para evaluar la relación entre el consumo de grasa en la dieta (extracto etéreo) con la producción de leche, el contenido de grasa y proteína en la leche, y se pudo observar que el consumo de extracto etéreo tuvo una correlación positiva sobre la producción de leche y su contenido de proteína, pero tiene una correlación baja en la producción de grasa (Tackett *et al.*, 1995).

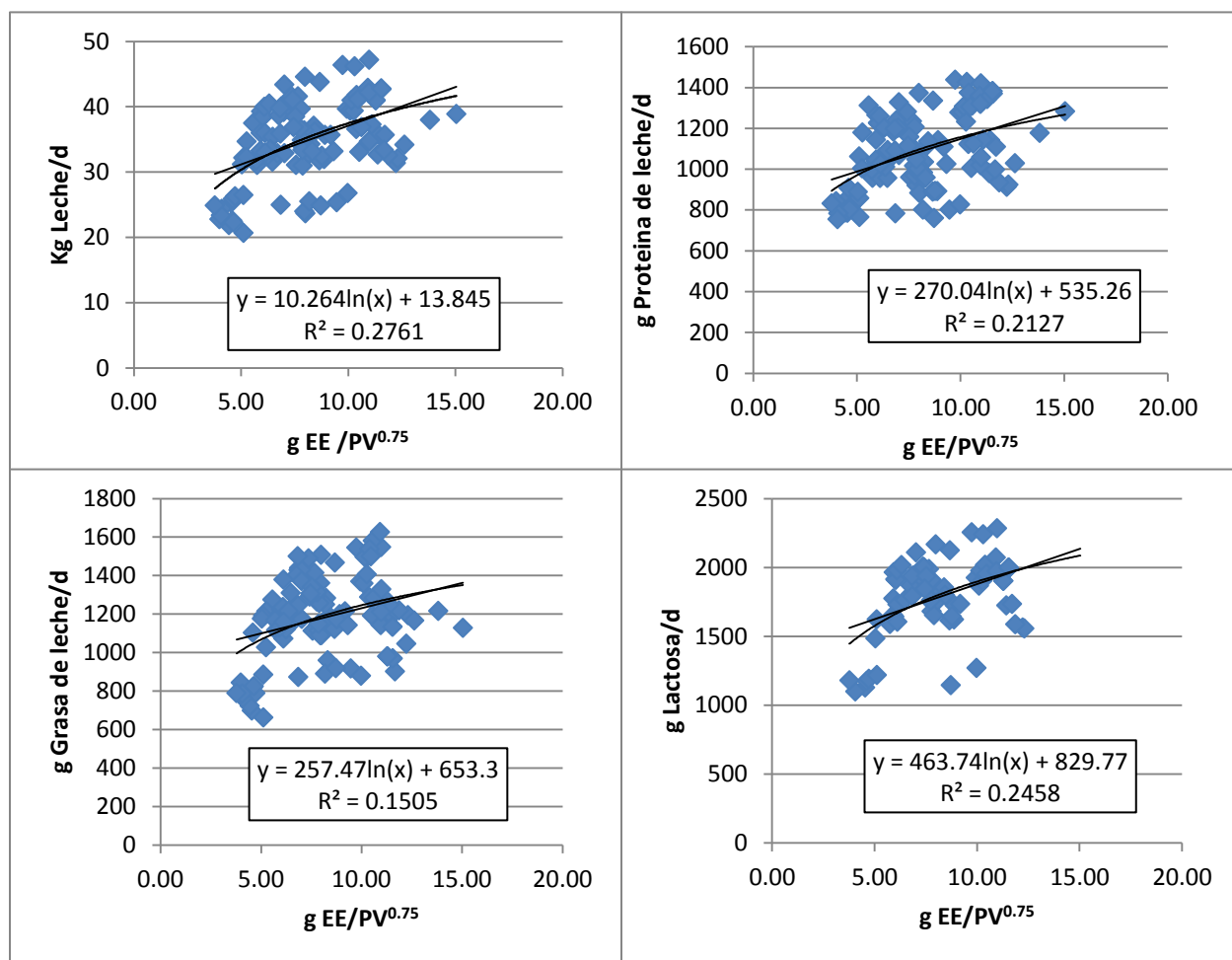
**Cuadro 11. Consumo de grasa promedio, máximo y mínimo.**

Fuente	No. Dietas	Consumo de grasa, g PV <sup>-0.75</sup>		
		Promedio	Máximo	Mínimo
Akayezu <i>et al.</i> , 1997.	8.00	9.27	11.71	7.84
Annexstad <i>et al.</i> , 1986.	4.00	7.97	8.24	7.57
Atwal y Erfle, 1991.	3.00	12.13	12.31	11.86
Atwal <i>et al.</i> , 1994.	4.00	7.85	7.95	7.75
Bertrand <i>et al.</i> , 1998.	3.00	6.85	8.00	4.59
Bowman <i>et al.</i> , 1987.	4.00	5.68	5.97	5.10
Brito y Broderick, 2007.	4.00	6.48	7.41	6.09
Broderick y Reynal, 2009.	4.00	5.98	6.04	5.92
Broderick <i>et al.</i> , 2009.	8.00	10.35	10.92	9.94
Broderick <i>et al.</i> , 2008.	8.00	7.19	7.79	6.76
Broderick <i>et al.</i> , 1993.	8.00	7.02	7.86	6.24
Canale <i>et al.</i> , 1989.	4.00	8.61	10.99	6.13
DePeters <i>et al.</i> , 1989.	4.00	6.63	9.97	3.78
DePeters <i>et al.</i> , 1984.	4.00	7.15	9.46	4.10
Feng <i>et al.</i> , 1993.	4.00	4.55	5.12	3.99
Hoffman <i>et al.</i> , 1991.	4.00	8.52	11.38	5.71
Leonardi <i>et al.</i> , 2005.	5.00	9.53	10.98	7.98
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	11.33	11.55	10.96
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	11.33	11.55	10.96
Polan <i>et al.</i> , 1995.	6.00	9.73	11.09	8.66
Ruppert <i>et al.</i> , 2003.	6.00	8.85	12.62	5.25
Shabi <i>et al.</i> , 1998.	4.00	4.75	5.11	4.54
Tackett <i>et al.</i> , 1995.	4.00	9.92	15.04	5.26
Valaderes <i>et al.</i> , 1999.	4.00	6.25	7.02	5.04
Del total de los artículos	115.00	8.16	15.04	3.78



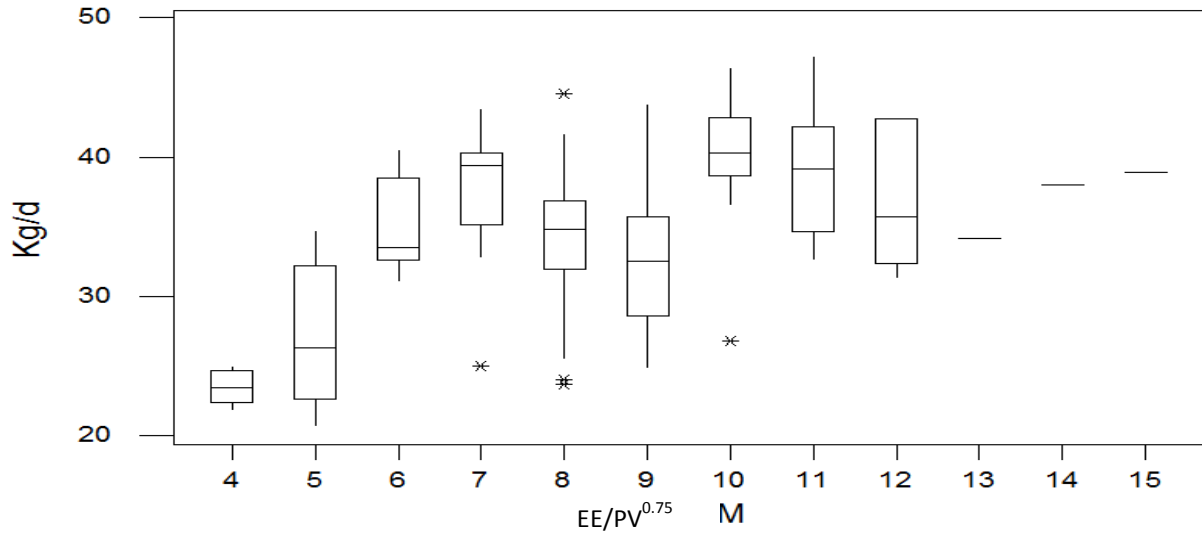
**Figura 12. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de extracto etéreo y la producción de leche y su contenido de proteína y grasa.**

Los coeficientes de correlación de Pearson entre el consumo de extracto etéreo y la producción de leche, y su contenido de proteína y grasa, resultaron con valores menores a 0.5. A pesar de esta baja correlación observada, está documentada la importancia de los lípidos en la dieta de los rumiantes, destacándose una mayor dependencia de estos compuestos, en comparación con los no rumiantes; asimismo, es conocido que dietas con niveles de grasa superiores a 5 % se relacionan con problemas de digestión de la fibra en el rumen, y de los lípidos absorbidos a partir de los alimentos se sintetiza el 40 % de la grasa de leche (Church, 1993); además las grasas se incluyen en la dieta para reducir el polvo de los concentrados, mejorar la formación de pellet y aumentar la energía de la dieta a un menor costo. La relación entre el consumo de grasa y la producción de leche, contenido de proteína y grasa, se puede observar en la Figura 12.



**Figura 13 Relación entre el consumo de extracto etéreo y la producción de leche, contenido de proteína, grasa y lactosa.**

A pesar de que en promedio aumenta la producción de leche cuando se incrementa el consumo de grasa (Figura 14), existe mucha variación pudiendo obtener producciones por encima a los 30 L d<sup>-1</sup> con dietas bajas en extracto etéreo, lo cual concuerda con lo reportado por Hoffman *et al.* (1991), Tackett *et al.* (1995) y Leonardi *et al.* (2005) quienes señalan que el consumo de grasa no aumenta la cantidad de esta en la leche, pero si puede aumentar la cantidad de leche que se produce.



**Figura 14 Diagrama de caja de la relación entre el consumo de extracto etéreo y la producción de leche.**

#### **6.3.4 Consumo de carbohidratos**

Los carbohidratos son la mayor fuente de energía de las dietas para ganado lechero, estos proveen de energía a los microorganismos del rumen y al rumiante, por lo que son fundamentales para la vida del animal (NRC, 2001). El consumo de carbohidratos se calculó con base a la suma ponderada de la cantidad de carbohidratos presentes en los ingredientes de la dieta y al consumo de materia seca reportado en el artículo, a dicho dato se le dividió entre el peso metabólico. Con base a la información reportada en los artículos, las dietas reportadas contenían en promedio 75.03 g PV<sup>-0.75</sup> (Cuadro 12) de carbohidratos no fibrosos y 55.44 g PV<sup>-0.75</sup> de fibra detergente neutro (Cuadro 13).



**Cuadro 12. Consumo de carbohidratos no fibrosos (CNF) promedio, máximo y mínimo.**

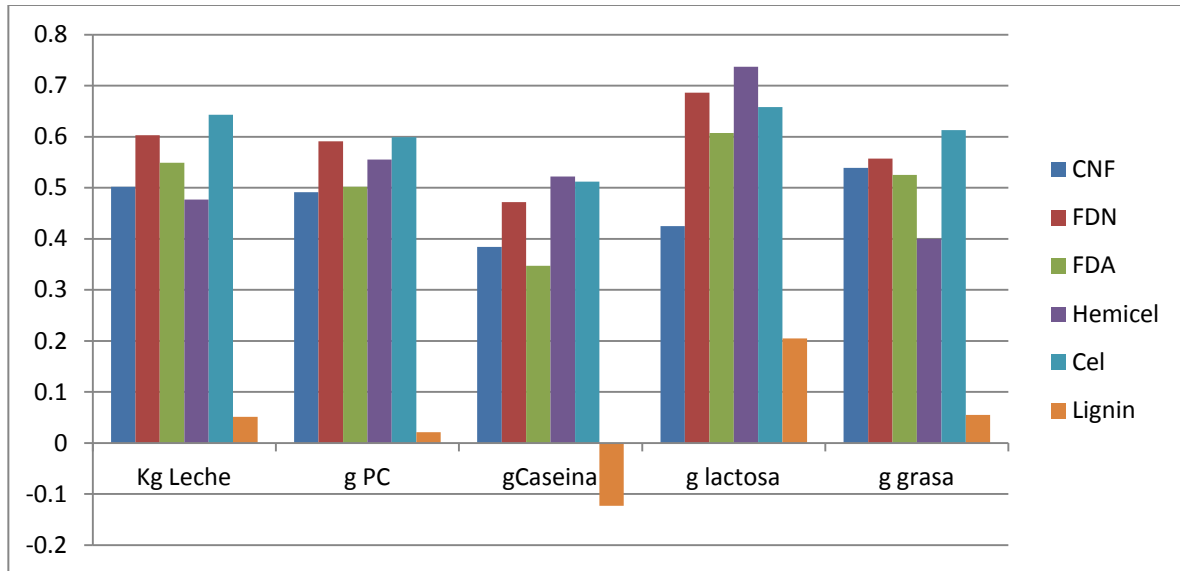
Fuente	No. dietas	CNF promedio	Máximo	Mínimo
		----- g PV <sup>-0.75</sup> -----		
Akayezu <i>et al.</i> , 1997.	8.00	79.34	84.46	75.29
Annexstad <i>et al.</i> , 1986.	4.00	71.94	73.95	69.91
Atwal y Erfle, 1991.	3.00	64.27	71.62	56.71
Atwal <i>et al.</i> , 1994.	4.00	68.33	70.26	66.17
Bertrand <i>et al.</i> , 1998.	3.00	68.25	75.10	64.61
Bowman <i>et al.</i> , 1987.	4.00	82.70	86.97	73.53
Brito y Broderick, 2007.	4.00	84.16	86.19	81.92
Broderick y Reynal, 2009.	4.00	84.73	85.49	83.82
Broderick <i>et al.</i> , 2009.	8.00	82.49	85.00	79.82
Broderick <i>et al.</i> , 2008.	8.00	78.21	85.58	73.74
Broderick <i>et al.</i> , 1993.	8.00	91.22	97.36	86.76
Canale <i>et al.</i> , 1989.	4.00	82.26	86.93	79.12
DePeters <i>et al.</i> , 1989.	4.00	61.63	68.22	50.14
DePeters <i>et al.</i> , 1984.	4.00	55.78	64.25	48.69
Feng <i>et al.</i> , 1993.	4.00	50.14	53.96	46.63
Hoffman <i>et al.</i> , 1991.	4.00	73.18	75.81	70.14
Leonardi <i>et al.</i> , 2005.	5.00	78.61	80.68	75.76
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	67.18	70.67	62.81
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	67.15	70.67	62.81
Polan <i>et al.</i> , 1995.	6.00	73.81	83.76	61.16
Ruppert <i>et al.</i> , 2003.	6.00	74.79	83.20	68.70
Shabi <i>et al.</i> , 1998.	4.00	73.84	79.50	70.61
Tackett <i>et al.</i> , 1995.	4.00	70.81	88.97	54.99
Valaderes <i>et al.</i> , 1999.	4.00	80.33	104.59	51.57
Del total de artículos	115.00	75.03	104.59	46.63

El NRC (2001) recomienda un consumo de carbohidratos no fibrosos entre el 30 al 40% de la dieta total en base seca, lo que significa que para un animal de 600 kg con un consumo de 22 kg de materia seca el NRC recomienda un consumo entre 54.44 y 72.58 g de CNF PV<sup>-0.75</sup>, dentro del rango del valor para el total de los artículos, y un consumo mínimo de FDN entre 25 y 35% del total de la dieta.

**Cuadro 13. Consumo de fibra detergente neutro (FDN) promedio, máximo y mínimo.**

Fuente	No. Dietas	FDN Promedio	Máximo	Mínimo
		----- g PV <sup>-0.75</sup> -----		
Akayezu <i>et al.</i> , 1997.	8.00	48.53	50.86	46.15
Annexstad <i>et al.</i> , 1986.	4.00	45.34	46.09	44.10
Atwal y Erfle, 1991.	3.00	44.67	47.62	42.75
Atwal <i>et al.</i> , 1994.	4.00	52.32	53.20	51.05
Bertrand <i>et al.</i> , 1998.	3.00	47.82	50.50	46.33
Bowman <i>et al.</i> , 1987.	4.00	47.01	48.81	44.80
Brito y Broderick, 2007.	4.00	62.23	67.97	54.29
Broderick y Reynal, 2009.	4.00	56.54	57.48	54.64
Broderick <i>et al.</i> , 2009.	8.00	64.79	67.71	62.52
Broderick <i>et al.</i> , 2008.	8.00	58.02	61.14	53.96
Broderick <i>et al.</i> , 1993.	8.00	59.91	61.23	56.65
Canale <i>et al.</i> , 1989.	4.00	55.68	57.64	54.74
DePeters <i>et al.</i> , 1989.	4.00	48.78	51.17	46.38
DePeters <i>et al.</i> , 1984.	4.00	58.34	62.42	52.72
Feng <i>et al.</i> , 1993.	4.00	46.87	48.24	44.69
Hoffman <i>et al.</i> , 1991.	4.00	54.27	55.54	52.49
Leonardi <i>et al.</i> , 2005.	5.00	65.25	66.83	64.07
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	60.43	62.98	58.77
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	60.45	63.02	58.81
Polan <i>et al.</i> , 1995.	6.00	57.84	61.58	55.57
Ruppert <i>et al.</i> , 2003.	6.00	52.37	58.63	47.68
Shabi <i>et al.</i> , 1998.	4.00	40.37	43.49	38.58
Tackett <i>et al.</i> , 1995.	4.00	61.75	72.99	50.81
Valaderes <i>et al.</i> , 1999.	4.00	64.75	73.75	49.27
Del total de artículos	115.00	55.44	73.75	38.58

Usando la base de datos se evaluó el efecto de los carbohidratos no fibrosos (CNF), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), fracción de hemicelulosa, fracción de celulosa+sílice y lignina con la producción de leche, grasa y proteína de la leche (Figura 15), donde se encontró que la FDN, la FDA y la fracción de celulosa en la dieta guardan una relación fuerte y positiva con la producción de leche, grasa y proteína, mientras que la lignina guarda una relación muy baja, como se puede observar en las siguientes gráficas.



**Figura 15. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de carbohidratos y la producción leche, y su contenido de lactosa, caseína, proteína y grasa.**

(CNF: Carbohidratos no fibrosos, FDN: Fibra detergente neutro, FDA: Fibra detergente ácido, Hemicel: Hemicelulosa, Cel: Celulosa, Lignin: Lignina).

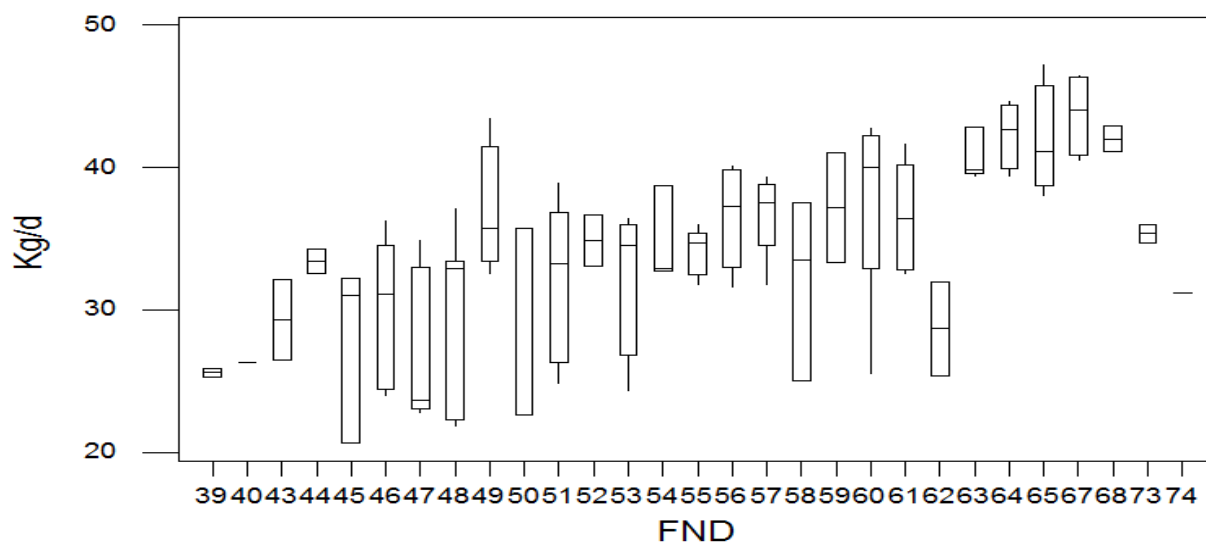
Existe una alta correlación entre el consumo de carbohidratos fibrosos con la producción de leche, a pesar de ello, en los artículos seleccionados se observó que existe una alta variación en los resultados si se toma en cuenta únicamente el consumo de los carbohidratos fibrosos en la dieta, pudiendo obtener producciones por encima de los 30 L con consumo bajos de fibra; no es el mismo caso para los carbohidratos no fibrosos, donde hay una clara tendencia a aumentar la producción de leche cuando aumenta el consumo de estos (Cuadro 14), lo que coincide con lo reportado por Cherney *et al.* (2003), donde en un estudio realizado a 20 vacas Holstein de 563 kg PV se les varió el contenido de CNF en sus dietas, se encontró que cuando se suministraba dietas con alto contenido de CNF aumentaba la producción de leche.

**Cuadro 14. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de carbohidratos y la producción leche, lactosa, caseína, proteína y grasa.**

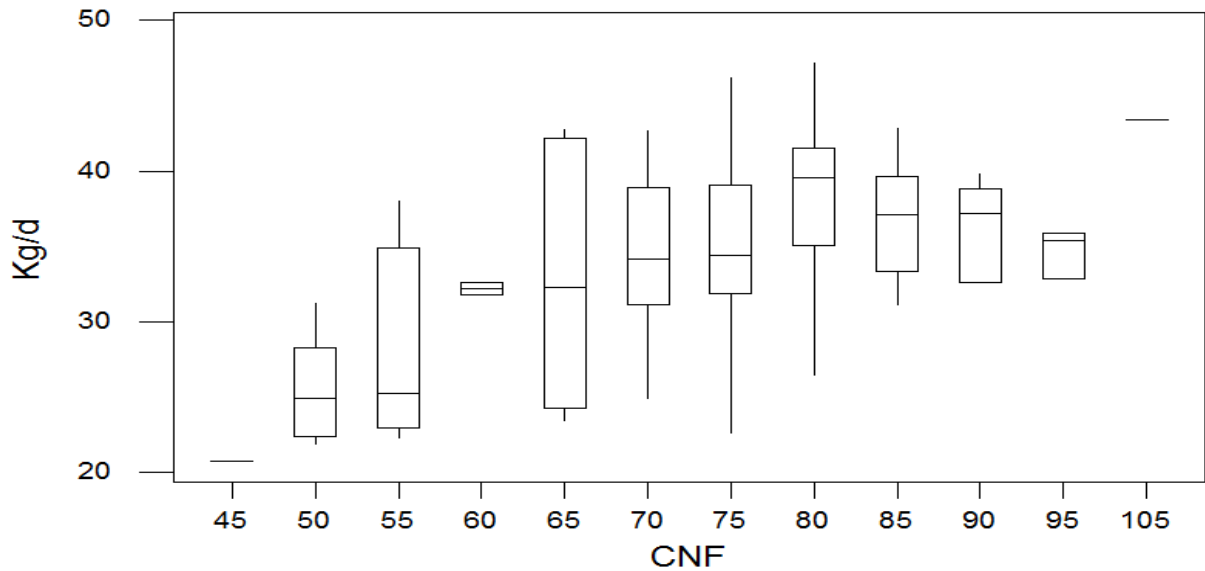
	Leche, kg	PC	Caseína	Lactosa	Grasa
CNF	0.502	0.491	0.384*	0.425	0.539
FDN	0.603	0.591	0.472	0.686	0.557
FDA	0.549	0.502	0.347*	0.607	0.525
Hemicelulosa	0.477	0.555	0.522	0.737	0.4
Celulosa	0.643	0.599	0.512	0.658	0.613
Lignina	0.051*	0.021*	-0.123*	0.205*	0.055*

CNF: Carbohidratos no fibrosos, FDN: Fibra detergente neutro, FDA: Fibra detergente ácido, Hemicel: Hemicelulosa, Cel: Celulosa, Lignin: Lignina.

\*Valor  $P > 0.05$  no significativo.



**Figura 16. Relación entre el consumo de fibra detergente neutro (FND, g PV<sup>0.75</sup>) y la producción de leche (kg d<sup>-1</sup>).**



**Figura 17. Relación entre el consumo de carbohidratos no fibrosos (CNF, g PV<sup>0.75</sup>) y la producción de leche (kg d<sup>-1</sup>).**

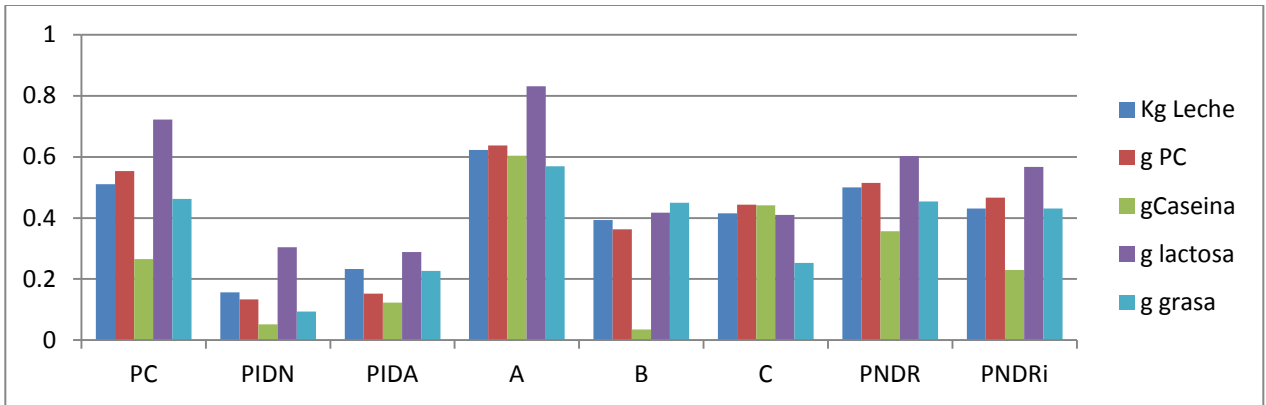
### 6.3.5 Consumo de proteína

Los rumiantes, por medio de los microorganismos del rumen, son capaces de utilizar nitrógeno no proteico (NNP) para formar proteínas; sin embargo, en ganado lechero la calidad proteica es fundamental para el desarrollo de formulaciones (Church, 2004). Para el análisis de los artículos seleccionados se calculó el consumo de proteína en base a la suma proporcional de la cantidad de proteína de cada ingrediente en la dieta y al consumo de materia seca reportado en los artículos analizados, a dicho dato se le dividió entre el peso metabólico. De forma general, se determinó un consumo de proteína cruda promedio de 31.22 g kg<sup>-1</sup> PM (Cuadro 15).

**Cuadro 15. Consumo de proteína cruda (PC) promedio, máximo y mínimo.**

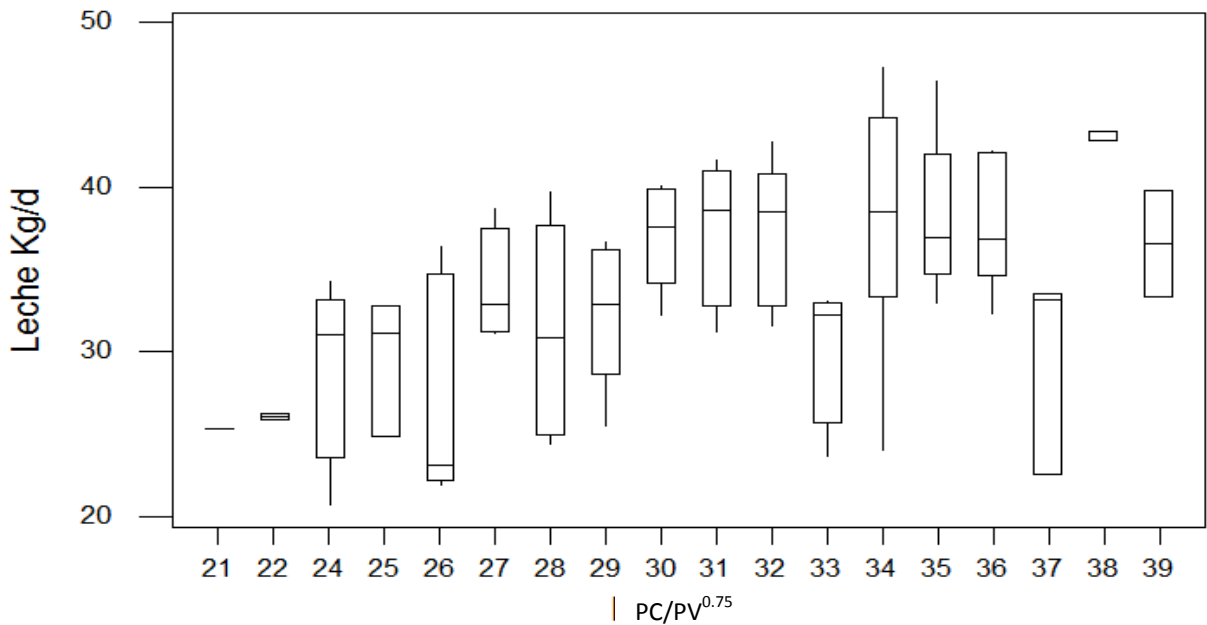
Fuente	No. Dietas	Promedio	Máximo	Mínimo
		PC ----- g PV <sup>-0.75</sup> -----		
Akayezu <i>et al.</i> , 1997.	8.00	29.55	36.43	26.90
Annexstad <i>et al.</i> , 1986.	4.00	24.55	24.75	24.40
Atwal y Erfle, 1991.	3.00	27.33	30.98	24.48
Atwal <i>et al.</i> , 1994.	4.00	27.56	29.58	25.68
Bertrand <i>et al.</i> , 1998.	3.00	34.67	37.46	32.57
Bowman <i>et al.</i> , 1987.	4.00	29.35	33.07	26.57
Brito y Broderick, 2007.	4.00	31.41	32.33	29.36
Broderick y Reynal, 2009.	4.00	31.65	32.03	31.38
Broderick <i>et al.</i> , 2009.	8.00	32.84	35.56	30.10
Broderick <i>et al.</i> , 2008.	8.00	30.06	34.59	26.94
Broderick <i>et al.</i> , 1993.	8.00	32.59	34.60	30.54
Canale <i>et al.</i> , 1989.	4.00	35.57	36.54	35.11
DePeters <i>et al.</i> , 1989.	4.00	27.10	28.42	25.30
DePeters <i>et al.</i> , 1984.	4.00	28.24	28.53	28.05
Feng <i>et al.</i> , 1993.	4.00	25.42	26.14	23.99
Hoffman <i>et al.</i> , 1991.	4.00	32.29	32.94	31.64
Leonardi <i>et al.</i> , 2005.	5.00	34.56	35.19	33.95
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	34.38	38.27	31.23
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	34.39	38.28	31.24
Polan <i>et al.</i> , 1995.	6.00	32.83	35.24	29.45
Ruppert <i>et al.</i> , 2003.	6.00	36.30	39.18	34.35
Shabi <i>et al.</i> , 1998.	4.00	22.22	23.93	21.24
Tackett <i>et al.</i> , 1995.	4.00	34.03	36.26	32.17
Valaderes <i>et al.</i> , 1999.	4.00	35.95	38.70	30.65
Del total de los artículos	115.00	31.22	39.18	21.24

Con la base de datos se midió el coeficiente de correlación de Pearson para la proteína cruda, la proteína no degradable en rumen, la proteína insoluble en detergente neutro, proteína insoluble en detergente ácido y las fracciones A, B, C de la proteína, de acuerdo con su digestibilidad en rumen, con relación a la producción de leche, proteína y grasa de esta (Figura 18); se determinó que las variables de proteína cruda, proteína no degradable en rumen, en cambio la cantidad de proteína insoluble en detergente neutro y en ácido tuvieron una relación menor con las variables de respuesta.



**Figura 18. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de proteína y la producción de leche, y su contenido de proteína y grasa**

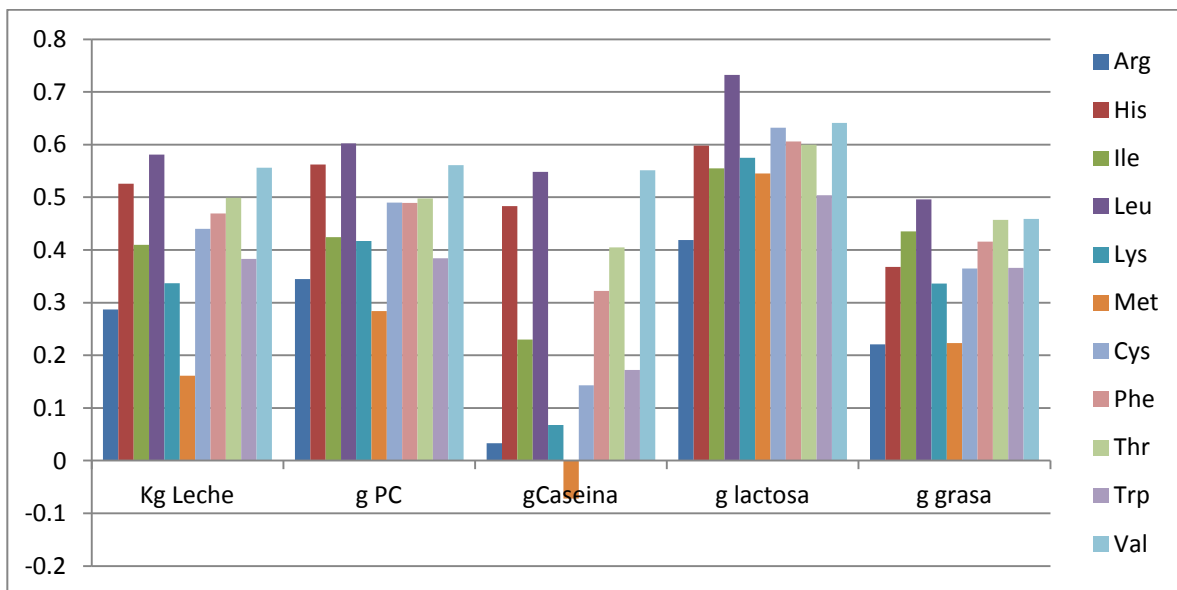
(PC: Proteína cruda, PIDN: Proteína insoluble en detergente neutro, PIDA: Proteína insoluble en detergente ácido, PNDR: Proteína no degradable en rumen, A, B, C: Fracciones de la proteína según la rapidez con la que se degrada en el rumen).



**Figura 19. Diagrama de caja de la relación entre el consumo de PC (g PV<sup>-0.75</sup>) y la producción de leche (kg d<sup>-1</sup>).**

De acuerdo a los resultados observados en la Figura 19, se pudo determinar que existe alta variación en la producción de leche, si se tomara en cuenta únicamente el consumo de proteína cruda, demostrando que es posible obtener producciones de leche muy bajas con alto o bajo consumo de proteína.

También se midió el coeficiente de correlación de Pearson para el consumo de aminoácidos esenciales de la proteína no degradable en rumen, con la producción de leche, y su contenido de proteína y grasa (Figura 20). Mediante este análisis, se determinó que no todos los aminoácidos que constituyen la proteína no degradable en rumen presentan alta correlación con la producción de leche.



**Figura 20. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de aminoácidos esenciales de la proteína no degradable en rumen y la producción de leche, y su contenido de proteína y grasa.**

(Arg: Arginina, His: Histidina, Ile: Isoleucina, Leu: Leucina, Lys: Lisina, Met: Metionina, Phe: Fenilalanina, Thr: Treonina, Val: Valina).



### 6.3.6 Consumo de minerales

Un número importante de elementos inorgánicos (minerales) son esenciales en pequeñas cantidades para el mantenimiento y producción de los animales (NRC, 2001). Se calculó el consumo de minerales con base a la suma ponderada de del contenido de minerales de los ingredientes de la dietas y al consumo de materia seca; a dicho dato se le dividió entre el peso metabólico promedio de los animales, reportado en el artículo.

El consumo promedio, máximo y mínimo de calcio de los artículos seleccionados para el desarrollo del modelo fue de 1.52, 2.71 y 0.47 g PV<sup>-0.75</sup> (Cuadro 16), el NRC (2001) recomienda un consumo de calcio absorbido para el mantenimiento de 0.0154 g kg<sup>-1</sup> de PV y un consumo de 1.22 g de calcio absorbido por cada litro de leche a producir, lo que significa que para una vaca de 600 kg con una producción de leche de 30 L la cantidad mínima de calcio que se debe proporcionar a la vaca es 0.38 g PV<sup>-0.75</sup>, en el Cuadro 16 se puede observar que todos los artículos seleccionados cumplían con el requerimiento de calcio.

**Cuadro 16. Consumo de calcio promedio, máximo y mínimo.**

Fuente	No. Dietas	Promedio	Máximo	Mínimo
		----- g PV <sup>-0.75</sup> -----		
Akayezu <i>et al.</i> , 1997.	8.00	1.70	1.92	1.46
Annexstad <i>et al.</i> , 1986.	4.00	1.26	1.29	1.22
Atwal y Erfle, 1991.	3.00	2.36	2.50	2.12
Atwal <i>et al.</i> , 1994.	4.00	1.74	1.79	1.69
Bertrand <i>et al.</i> , 1998.	3.00	1.48	1.56	1.43
Bowman <i>et al.</i> , 1987.	4.00	1.47	1.53	1.43
Brito y Broderick, 2007.	4.00	1.28	1.47	1.09
Broderick y Reynal, 2009.	4.00	1.00	1.03	0.95
Broderick <i>et al.</i> , 2009.	8.00	1.16	1.22	1.11
Broderick <i>et al.</i> , 2008.	8.00	0.91	0.97	0.84
Broderick <i>et al.</i> , 1993.	8.00	2.34	2.71	1.83
Canale <i>et al.</i> , 1989.	4.00	1.60	1.65	1.53
DePeters <i>et al.</i> , 1989.	4.00	1.70	1.94	1.38
DePeters <i>et al.</i> , 1984.	4.00	1.48	1.49	1.47
Feng <i>et al.</i> , 1993.	4.00	1.10	1.25	0.98
Hoffman <i>et al.</i> , 1991.	4.00	1.41	1.44	1.39
Leonardi <i>et al.</i> , 2005.	5.00	1.57	1.60	1.52
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	1.38	1.46	1.32
Leonardi <i>et al.</i> , 2003.	4.00	1.38	1.46	1.32
Polan <i>et al.</i> , 1995.	6.00	1.82	1.98	1.52
Ruppert <i>et al.</i> , 2003.	6.00	1.88	2.08	1.73
Shabi <i>et al.</i> , 1998.	4.00	0.49	0.53	0.47
Tackett <i>et al.</i> , 1995.	4.00	1.70	1.91	1.51
Valaderes <i>et al.</i> , 1999.	4.00	2.00	2.36	1.44
Del total de los artículos	115.00	1.52	2.71	0.47

A partir de la base de datos se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre los macro minerales en las diferentes dietas y la producción de leche, proteína, grasa y lactosa. (Cuadro 17).

**Cuadro 17. Coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo de macrominerales y la producción de leche, y su contenido de proteína y grasa.**

	Leche, kg	PC -----	Lactosa g kg <sup>0.75</sup> -----	Grasa
Cenizas	0.029*	0.055*	-0.006*	0.046*
Ca	-0.036*	-0.117*	-0.04*	0.076*
P	0.004*	0.023*	0.034*	0.039*
Mg	-0.13*	-0.149*	-0.111*	0.138*
K	0.026*	0.089*	0.137*	0.18*
Na	0.093*	-0.084*	-0.128*	0.252
Cl	0.194*	0.081*	0.209*	0.286
S	0.039*	0.015*	0.216*	0.284

\* Valor P>0.05, no significativo.

No se encontró una relación significativa para los minerales analizados, a excepción de sodio, cloro y azufre los cuales si tienen una correlación significativa con la producción de grasa de leche, lo anterior se explica porque la mayoría de las dietas analizadas cumplían o excedían con los requerimientos de minerales, originando que las variaciones de las dietas no afectaran la producción de leche.

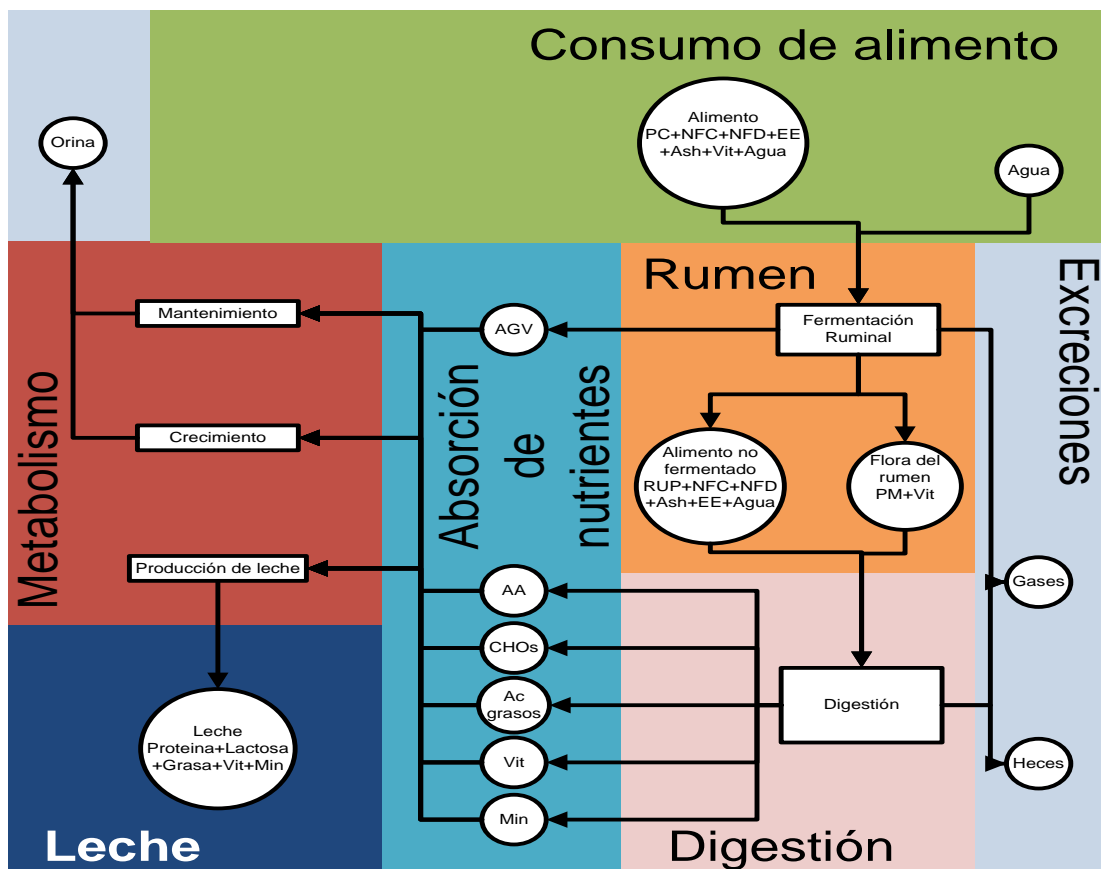
#### 6.4 Elaboración de regresiones lineales

Con base al diagrama presentado en la Figura 21, el alimento que la vaca consume, a su paso por el rumen, es degradado en alta proporción por los microorganismos ruminales, produciendo ácidos grasos volátiles (AGV), nitrógeno amoniacal y gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, entre otros) que son excretados al ambiente; parte de la proteína y el

nitrógeno no proteínico que es degradado, se convierte en biomasa microbiana, la cual pasa al abomaso y junto con el alimento no degradado continua su proceso de digestión; finalmente parte de esta se absorbe en forma de aminoácidos, carbohidratos, ácidos grasos, vitaminas y minerales, son metabolizados por el animal, y utilizados para el mantenimiento y producción de la vaca. Los nutrientes del alimento son digeridos y absorbidos para el mantenimiento, crecimiento y producción de leche, condicionando de alguna forma la cantidad y calidad de la leche que se produce, con la cantidad y composición química del alimento consumido.

$$Y = \text{Leche, Proteína, Grasa, Lactosa} \frac{\text{kg}}{\text{d}} = (K_1) \text{Alimento} \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

**EC 17. Relación entre la producción de leche y el consumo de alimento.**



**Figura 21. Modelo del proceso de producción de leche y su composición química.**

Usando el logaritmo natural de las variables explicativas seleccionadas anteriormente para representar las partes principales del alimento en el modelo se obtiene la EC 18:

$$Y = \beta_0 + \beta_1(ENL) + \beta_2(EF) + \beta_3(CNF) + \beta_4(Hem) + \beta_5(Cell) + \beta_6(Lig) + \beta_7(CP - RUP) + \beta_8(Arg) \\ + \beta_9(His) + \beta_{10}(Ile) + \beta_{11}(Leu) + \beta_{12}(Lys) + \beta_{13}(Met) + \beta_{14}(Cys) + \beta_{15}(Cys) + \beta_{16}(Phe) \\ + \beta_{17}(Thr) + \beta_{18}(Trp) + \beta_{19}(Val) + \beta_{20}(Cal) + \beta_{21}(P) + \beta_{22}(Mg) + \beta_{23}(K) + \beta_{24}(Na) \\ + \beta_{25}(Cl) + \beta_{26}(S) + \varepsilon_{ij}$$

**EC 18. Ecuación general para las regresiones del Modelo.**

La EC 18 es una forma lineal con la cual se puede hacer una regresión por método de mínimos cuadrados, usando los datos de los artículos seleccionados se obtiene las ecuaciones EC 19 a 23, las cuales son las regresiones lineales para la predicción de leche, proteína de leche, grasa de leche, lactosa caseína, respectivamente:

$$\text{Leche} \frac{\text{kg}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{EE^{6.3} NFC^{8.7} Hem^{6.9} Cel^{20.2} Arg^{0.3} His^{20.9} Leu^{30.9} Lys^{0.1} Cys^{4.6} Trp^{25} P^{3.8} Mg^{7.6} Cl^{6.9}}{NEL^{2.3} Lig^{5.48} (CP - RUP)^{4.28} Ile^{3.4} Met^{0.2} Phe^{43.7} Thr^{36.2} Val^5 Ca^{5.5} K^{1.5} Na^2 S^{7.29}} \right] - 34.8$$

(S = 2.192, R-Sq = 90.6 %, R-Sq(adj) = 87.5 %).

**EC 19. Predicción de la producción de leche (versión factorizada).**

$$\text{Prot} \frac{\text{g}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{NEL^{368} EE^{121} NFC^{177} Hem^{267} Cel^{390} His^{687} Ile^{199} Leu^{655} Lys^{55} Met^{5.6} Cys^{86} Trp^{996} Val^{355} P^{209} Mg^{151} Cl^{250}}{Lig^{137} (CP - RUP)^{201} Arg^{31} Phe^{1467} Thr^{1556} Ca^{270} K^{0.8} Na^{102} S^{63.3}} \right] + 780$$

(S = 66.08, R-Sq = 90.4 %, R-Sq(adj) = 87.2 %).

**EC 20. Predicción de la producción de proteína (versión factorizada).**

$$\text{Grasa} \frac{\text{g}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{EE^{98} NFC^{335} Hem^{209} Cel^{475} Ile^{729} Leu^{1723} Lys^{205} Trp^{730} Val^{1386} Mg^{88.5} K^{240} Na^{53.3} S^{425}}{NEL^{79} Lig^{38} (CP - RUP)^{328} Arg^{78} His^{409} Met^{51.2} Cys^{55} Phe^{1599} Thr^{2243} Ca^{106} P^{119} Cl^{125}} \right] - 1886$$

(S = 97.92, R-Sq = 83.5 %, R-Sq(adj) = 77.9 %).

**EC 21. Predicción de la producción de grasa en la leche (versión factorizada)**

$$\text{Lactosa } \frac{\text{g}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{\text{EE}^{36} \text{NFC}^{243} \text{Hem}^{808} \text{Cel}^{512} \text{Arg}^{614} \text{His}^{579} \text{Leu}^{3679} \text{Lys}^{820} \text{Trp}^{2308} \text{Val}^{540} \text{Mg}^{356} \text{K}^{371} \text{Cl}^{409}}{\text{NEL}^{573} \text{Lig}^{429} (\text{CP} - \text{RUP})^{80} \text{Ile}^{437} \text{Met}^{11.9} \text{Cys}^{105} \text{Phe}^{4179} \text{Thr}^{3658} \text{Ca}^{40} \text{P}^{43} \text{Na}^{69.2} \text{S}^{150}} \right] - 2522$$

(S=80.91, R-Sq = 94.8 %, R-Sq(adj) = 91.4 %)

**EC 22. Predicción de producción de lactosa en la leche (versión factorizada).**

$$\text{Caseína } \frac{\text{g}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{\text{EE}^{78.4} \text{Lig}^{146} (\text{CP} - \text{RUP})^{837} \text{His}^{15797} \text{Lys}^{244} \text{Cys}^{5747} \text{Trp}^{6149} \text{Val}^{15430} \text{Ca}^{1238} \text{Mg}^{830} \text{K}^{3523} \text{Na}^{954} \text{S}^{859}}{\text{NEL}^{673} \text{NFC}^{2276} \text{Hem}^{159} \text{Cel}^{3212} \text{Arg}^{4213} \text{Ile}^{178} \text{Leu}^{2881} \text{Met}^{54.6} \text{Phe}^{15516} \text{Thr}^{3992} \text{P}^{4387} \text{Cl}^{875}} \right] + 26656$$

(S=1.381, R-SQ = 100.0 %, R-SQ(ADJ) = 100.0 %)

**EC 23. Predicción de producción de caseína en la leche (versión factorizada).**

#### 6.4.1 Predicción de la producción de leche

El modelo de regresión para la predicción de la cantidad de leche que se produce al día se describe en la ecuación EC 24 y los cuadros 18 y 19.

$$\text{Leche } \text{kg } \text{d}^{-1} = -34.8 - 2.3 \text{ LN(ENL)} + 6.33 \text{ LN(EE)} + 8.7 \text{ LN(CNF)} + 6.87 \text{ LN(Hemicel)} + 20.2 \text{ LN(Cel)} - 5.48 \text{ LN(Lig)} - 4.28 \text{ LN(PC-PNDR)} + 0.32 \text{ LN(Arg)} + 20.9 \text{ LN(His)} - 3.4 \text{ LN(Ile)} + 30.9 \text{ LN(Leu)} + 0.09 \text{ LN(Lys)} - 0.22 \text{ LN(Met)} + 4.59 \text{ LN(Cys)} - 43.7 \text{ LN(Phe)} - 36.2 \text{ LN(Thr)} + 35.0 \text{ LN(Trp)} - 5.0 \text{ LN(Val)} - 5.53 \text{ LN(Ca)} + 3.81 \text{ LN(P)} + 7.62 \text{ LN(Mg)} - 1.45 \text{ LN(K)} - 1.96 \text{ LN(Na)} + 6.89 \text{ LN(Cl)} - 7.29 \text{ LN(S)}$$

$$S = 2.192 \quad R\text{-Sq} = 90.6\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 87.5\%$$

**EC 24. Regresión lineal para la producción de leche por día.**

**Cuadro 18. Coeficientes de regresión para la predicción de la producción de leche.**

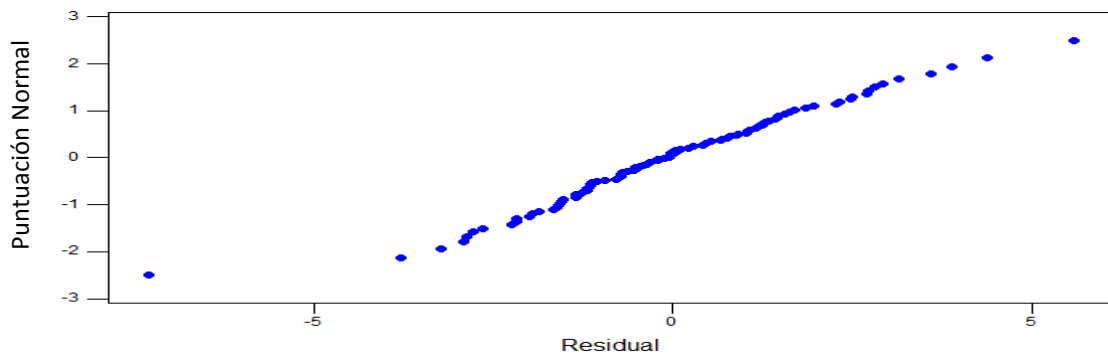
Predictor	Coeficient e	Coeficiente SE	T	P
Constante	-34.82	82.63	-0.42	0.675
NEL	-2.31	21.44	-0.11	0.914
EE	6.328	3.076	2.06	0.043
NFC	8.72	11.36	0.77	0.445
Hemicelulosa	6.869	3.838	1.79	0.078
Celulosa	20.178	4.955	4.07	0.000
Lignina	-5.477	2.986	-1.83	0.071
PDR	-4.284	3.316	-1.29	0.200
Arginina	0.318	6.485	0.05	0.961
Histidina	20.947	9.073	2.31	0.024
Isoleusina	-3.41	19.36	-0.18	0.861
Leusina	30.86	16.08	1.92	0.059
Lisina	0.092	3.898	0.02	0.981
Metionina	-0.217	1.858	-0.12	0.907
Cisteína	4.586	6.063	0.76	0.452
Fenilalanina	-43.68	21.23	-2.06	0.043
Treonina	-36.20	30.64	-1.18	0.241
Triptófano	34.96	10.28	3.40	0.001
Valina	-5.02	23.17	-0.22	0.829
Ca	-5.528	2.322	-2.38	0.020
P	3.815	2.307	1.65	0.102
Mg	7.617	1.790	4.26	0.000
K	-1.450	2.421	-0.60	0.551
Na	-1.9576	0.7319	-2.67	0.009
Cl	6.887	1.586	4.34	0.000
S	-7.291	2.914	-2.50	0.015

**Cuadro 19. Análisis de varianza para la predicción de leche.**

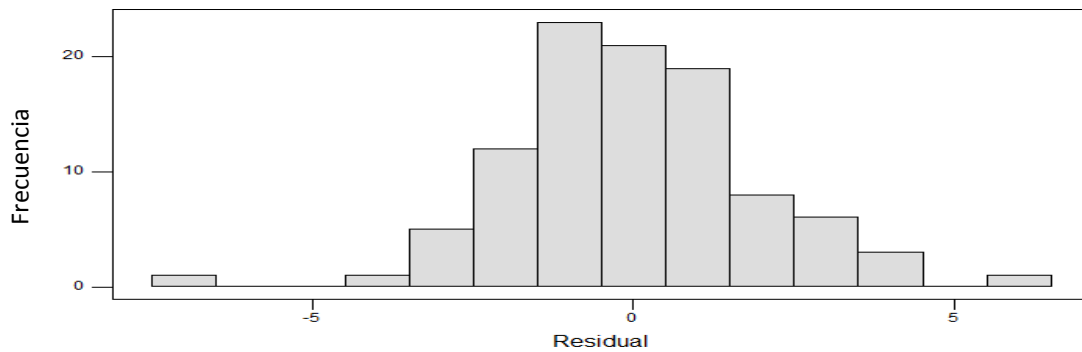
Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	25	3444.3	137.77	28.68	<0.01
Error	74	355.5	4.8		
Total	99	3799.8			

La distribución de los residuales del modelo de regresión tiene una distribución normal (Figura 22 y 23) (Valor  $P > 0.05$ , con prueba de Anderson-Darling), con media cero y varianza constante (Figura 24), por lo que cumple con los supuestos para

modelos lineales. El modelo de regresión para la predicción de la cantidad de leche por mínimos cuadrados no presenta sesgo, de acuerdo a los litros de leche que se producen en los experimentos reportados en los artículos, ni por el número de animales con los que se realizaron los experimentos (Figura 25 y 26), es decir los residuales no presentan una tendencia a ser más grandes o más pequeños entre las diferentes dietas, a pesar de las diferencias en el número de animales utilizados en cada experimento y los niveles de producción de leche reportados, lo que indica que el modelo de predicción de la producción de leche funciona por igual, con el mismo margen de error para diferentes niveles de producción de leche.

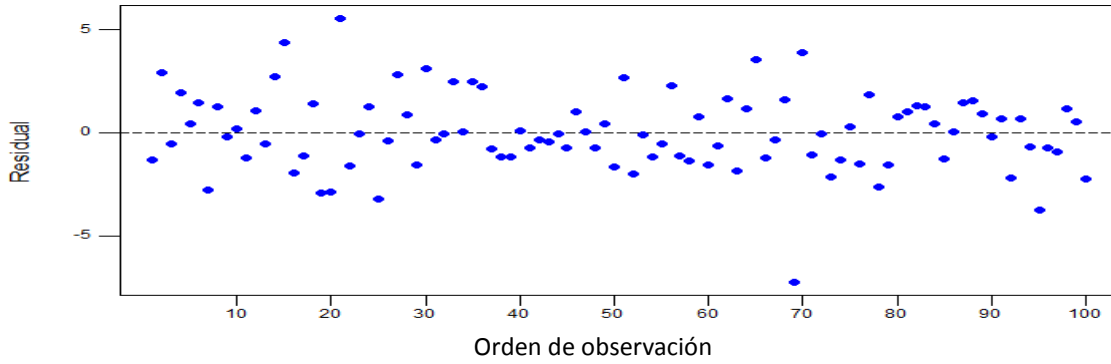


**Figura 22. Normalidad para el modelo de regresión de la predicción de cantidad de leche producida.**

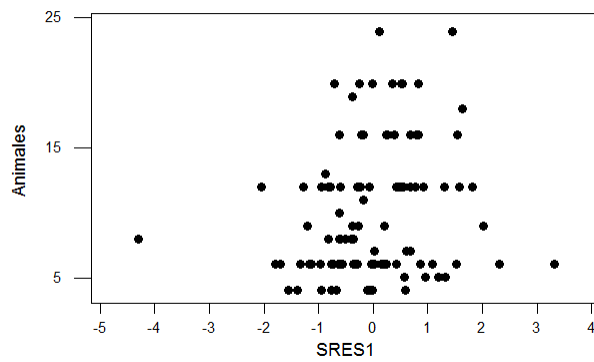


**Figura 23. Residuales para el modelo de regresión de la predicción de cantidad de leche producida.**

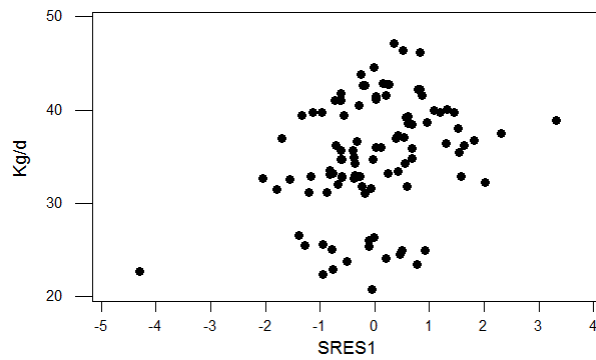




**Figura 24. Dispersión de los residuales contra el orden de observación.**



**Figura 25. Dispersión del número de animales por tratamiento contra los residuales estandarizados (SRES1).**

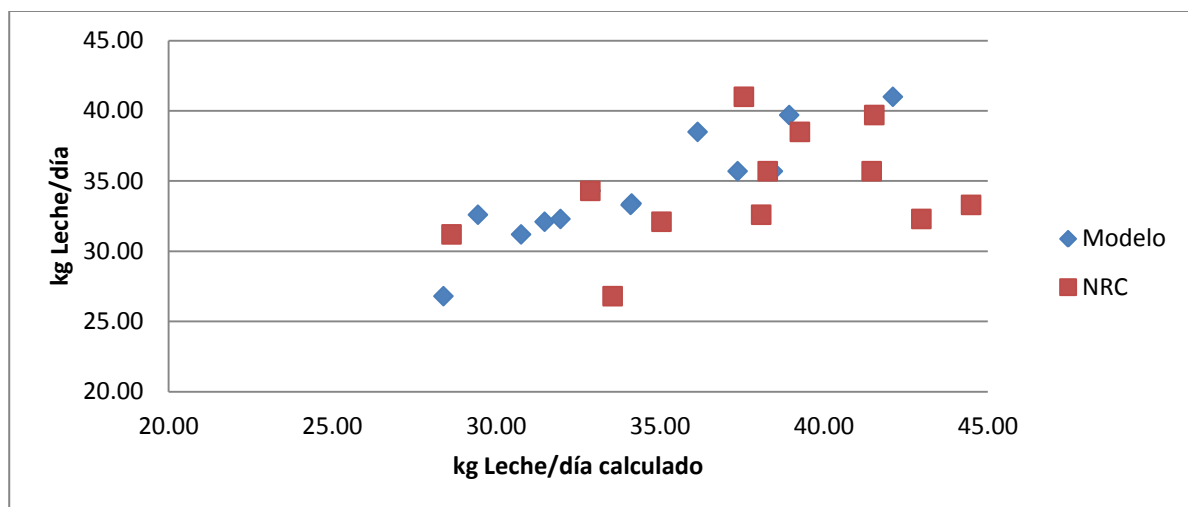


**Figura 26. Dispersión de la leche producida (kg d<sup>-1</sup>) contra los residuales estandarizados (SRES1).**

Se probó el modelo contra los datos reportados en 13 dietas distintas a las utilizadas para el desarrollo del modelo (Figura 27) y se comparó el resultado contra los obtenidos con las ecuaciones del NRC (2001) para ganado lechero, donde se encontró que la regresión para la predicción de la cantidad de leche se aproxima mejor a los datos reportados en los artículos que la ecuación propuesta por el NRC para ganado lechero, ya que la ecuación del modelo cuenta con una  $R^2_{\text{predicción}}$  de 80.6 %. y un error de predicción promedio al cuadrado ( $MS_{\text{Error}}$ ) de 2.62, similar al valor reportado en el análisis de varianza del Cuadro 19 (4.8), indicando que la media de los residuales obtenidos en la elaboración del modelo es similar a la obtenida en la validación del modelo usando datos nuevos, sugiriendo que el modelo elaborado se comporta de forma similar con los datos utilizados para el desarrollo del modelo y con los nuevos datos.

Además los residuales obtenidos con la ecuación del modelo elaborado presentan una desviación estándar de 1.68 y un coeficiente de variación del 2 %, mientras que los residuales obtenidos con la ecuación del NRC (2001) para ganado lechero, obtuvieron una desviación estándar de 5.4 y un coeficiente de variación del 77 %, es decir el modelo elaborado se ajusta mejor a los datos reportados en los artículos que la predicción hecha con el modelo del NRC 2001.

A pesar de estos resultados, no se probaron datos procedentes de artículos hechos en México, ni se realizaron pruebas con animales, por lo que en explotaciones intensivas de ganado lechero en nuestro país, la regresión elaborada para la predicción de la cantidad de leche puede tener un rango de error más amplio.



**Figura 27. Cantidad de leche observada en nuevos datos contra la cantidad de leche predicha por el modelo elaborado y por el modelo del NRC 2001.**

#### 6.4.2 Predicción de la producción de proteína en la leche

El modelo de regresión para la predicción de la cantidad de proteína en la leche se describe en la ecuación EC 25 y las características de este modelo se describen en los cuadros 20 y 21.

Proteína cruda,  $g\ d^{-1} = 780 + 368\ LN(ENL) + 121\ LN(EE) + 177\ LN(CNF) + 267\ LN(Hemicel) + 390\ LN(Cel) - 137\ LN(Lig) - 201\ LN(PC-PNDR) - 33\ LN(Arg) + 687\ LN(His) + 199\ LN(Ile) + 655\ LN(Leu) + 55\ LN(Lys) + 5.6\ LN(Met) + 86\ LN(Cys) - 1467\ LN(Phe) - 1557\ LN(Thr) + 996\ LN(Trp) + 355\ LN(Val) - 270\ LN(Ca) + 209\ LN(P) + 151\ LN(Mg) - 0.8\ LN(K) - 102\ LN(Na) + 250\ LN(Cl) - 63.3\ LN(S)$

$$S = 66.07 \quad R-Sq = 90.4\% \quad R-Sq(adj) = 87.2\%$$

**EC 25. Regresión lineal para la producción de proteína en la leche.**

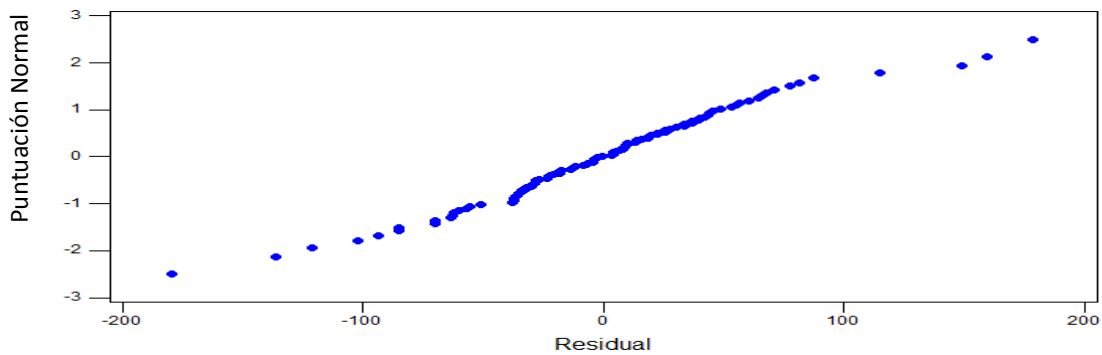
**Cuadro 20. Coeficientes de regresión para la predicción de la proteína de leche.**

Predictor	Coef	SE	T	P
Constante	780	2491	0.31	0.755
ENL-	368.2	646.2	0.57	0.571
EE	121.01	92.71	1.31	0.196
CNF	177.1	342.4	0.52	0.607
Hemicelulosa	267.4	115.7	2.31	0.024
Celulosa	390.1	149.4	2.61	0.011
Lignina	-137.4	90.01	-1.53	0.131
PDR	-200.8	99.94	-2.01	0.048
Arginina	-32.6	195.5	-0.17	0.868
Histidina	687.3	273.5	2.51	0.014
Isoleucina	199.4	583.6	0.34	0.734
Leucina	654.9	484.8	1.35	0.181
Lisina	54.7	117.5	0.47	0.643
Metionina	5.58	56.02	0.1	0.921
Cisteina	86	182.8	0.47	0.639
Fenilalanina	-1467	640	-2.29	0.025
Treonina	-1557	923.7	-1.69	0.096
Triptofano	996.3	309.8	3.22	0.002
Valina	354.6	698.3	0.51	0.613
Ca	-270	69.99	-3.86	0
P	208.75	69.53	3	0.004
Mg	150.98	53.96	2.8	0.007
K	-0.78	72.97	-0.01	0.991
Na	-102.2	22.06	-4.63	0
Cl	249.52	47.82	5.22	0
S	-63.31	87.83	-0.72	0.473

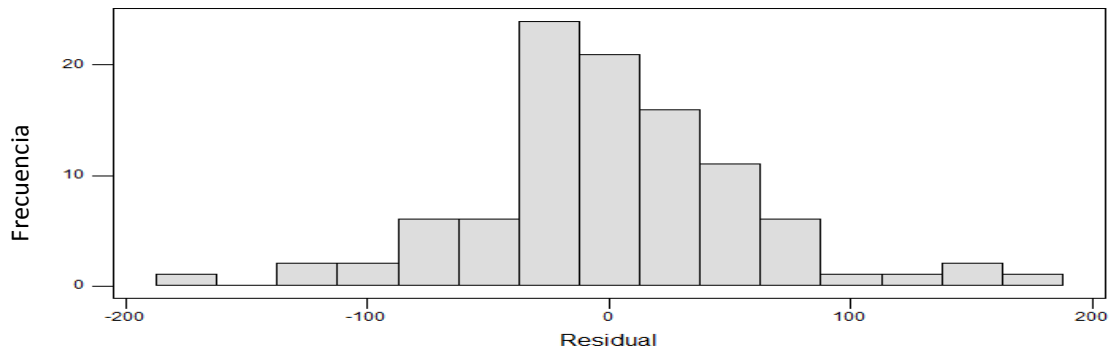
**Cuadro 21. Análisis de varianza de la predicción de la proteína de leche.**

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	25	3052904	122116	27.98	<0.01
Error	74	323004	4365		
Total	99	3375908			

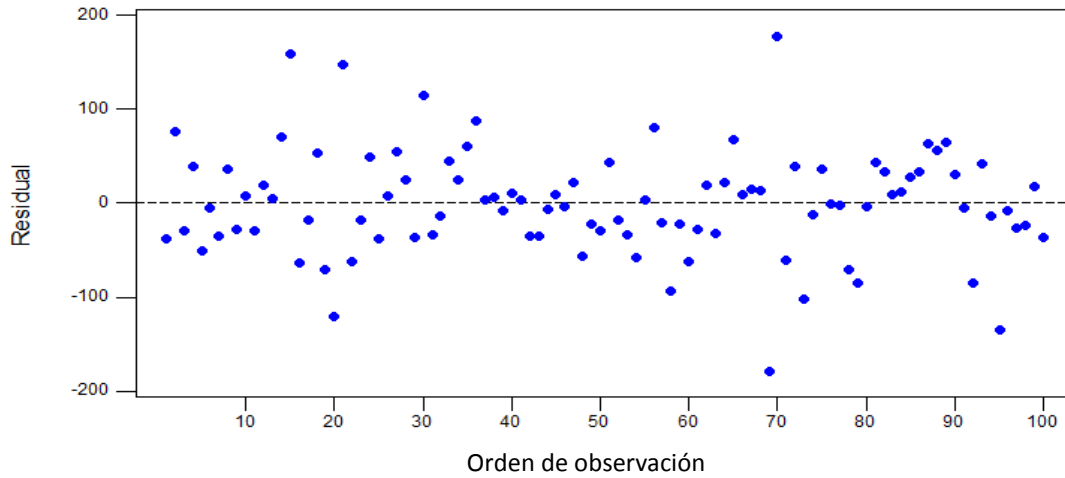
Los residuales del modelo de regresión mostraron una distribución normal (Figura 28 y 29) ( $P > 0.05$ ; Anderson-Darling), con media cero y varianza constante (Figura 30), por lo que cumple con los supuestos para modelos lineales. El modelo de regresión por mínimos cuadrados desarrollado para la predicción de la cantidad de proteína de leche no presenta sesgo por efecto del número de animales utilizados en los tratamientos, ni por la producción de proteína reportada en los artículos (Figura 31 y 32), en este sentido, los residuales del modelo de regresión para la predicción de proteína de la leche son similares para los distintos niveles de producción de proteína evaluadas en el desarrollo del modelo.



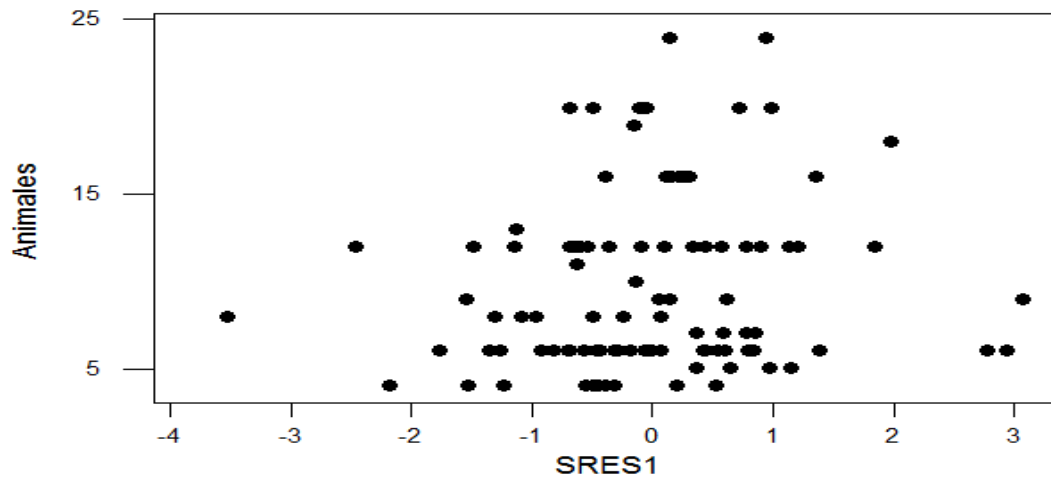
**Figura 28. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de proteína en la leche.**



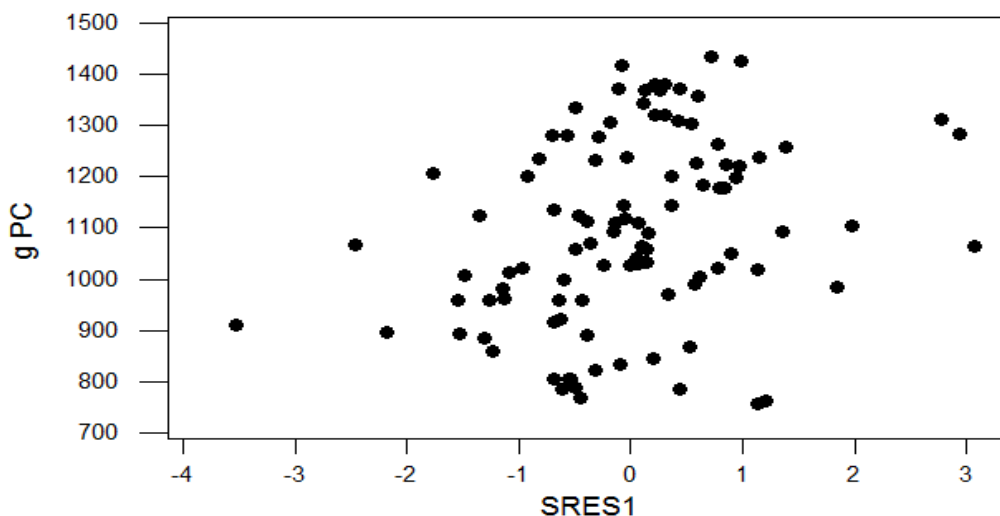
**Figura 29. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de proteína en la leche.**



**Figura 30. Dispersión de los residuales del modelo de desarrollado para predecir la cantidad de proteína en la leche contra el orden de observación.**



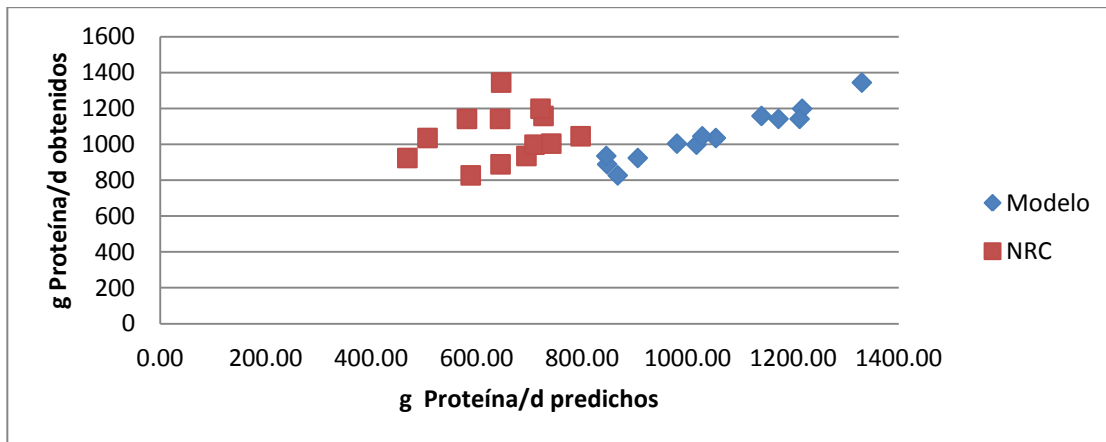
**Figura 31. Dispersión del número de animales por tratamiento contra los residuales estandarizados (SRES1)**



**Figura 32. Dispersión de la cantidad de proteína producida contra los residuales estandarizados (SRES1).**

Se probó el modelo contra los datos reportados en 13 dietas distintas a las utilizadas para el desarrollo del modelo y se comparó con los resultados obtenidos, usando la ecuación del NRC (2001) para ganado lechero (Figura 33), se encontró que la regresión del modelo se aproxima mejor a los datos reportados en los artículos, en comparación a la ecuación del NRC, debido a que tiene una  $R^2_{\text{predicción}}$  de 91.9 % y un  $MS_{\text{Error}}$  de 1539, similar al valor reportado en el Cuadro 21, indicando que la media de los residuales obtenidos en la elaboración del modelo es similar a la media de los residuales en la validación del modelo, usando nuevos datos.

Además los residuales obtenidos en la validación del modelo elaborado para la predicción de proteína láctea tienen una desviación estándar de 40.7 mientras los residuales usando la ecuación del NRC (2001) para ganado lechero tuvieron una desviación estándar de 153 g PC d<sup>-1</sup>, por lo que el modelo elaborado se ajusta mejor a la proteína reportada en los artículos que lo predicho usando la ecuación del NRC (2001); sin embargo, no se realizaron pruebas con animales, ni con datos procedentes de artículos realizados en México, por lo que el error puede ser mayor si se utilizara dicha ecuación en nuestro país.



**Figura 33. Prueba del modelo, diagrama de dispersión de la cantidad de proteína en la leche observada en nuevos datos contra la cantidad de proteína en la leche predicha con el modelo.**

Los datos del NRC se obtuvieron en base a la ecuación EC 15, despejando la ecuación para porcentaje de proteína láctea

#### **6.4.3 Predicción de la producción de grasa de leche**

El modelo de regresión desarrollado para la predicción de la cantidad de grasa de la leche que se produce al día se presenta en la ecuación EC 26 y las características del mismo se describen en los cuadros 22 y 23.

$$\text{Grasa g d}^{-1} = - 1886 - 79 \text{ LN(ENL)} + 98 \text{ LN(EE)} + 335 \text{ LN(CNF)} + 209 \text{ LN(Hemicel)} + 475 \text{ LN(Cel)} - 38 \text{ LN(Lig)} - 328 \text{ LN(PC-PNDR)} - 78 \text{ LN(Arg)} - 409 \text{ LN(His)} + 729 \text{ LN(Ile)} + 1723 \text{ LN(Leu)} + 205 \text{ LN(Lys)} - 51.2 \text{ LN(Met)} - 55 \text{ LN(Cys)} - 1599 \text{ LN(Phe)} - 2243 \text{ LN(Thr)} + 730 \text{ LN(Trp)} + 1386 \text{ LN(Val)} - 106 \text{ LN(Ca)} - 119 \text{ LN(P)} + 88.5 \text{ LN(Mg)} + 240 \text{ LN(K)} + 53.3 \text{ LM(Na)} - 125 \text{ LN(Cl)} + 425 \text{ LN(S)}$$

$$S = 97.92 \quad R\text{-Sq} = 83.5\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 77.9\%$$

**EC 26. Regrsión lineal para estimar el contenido de grasa en la leche.**



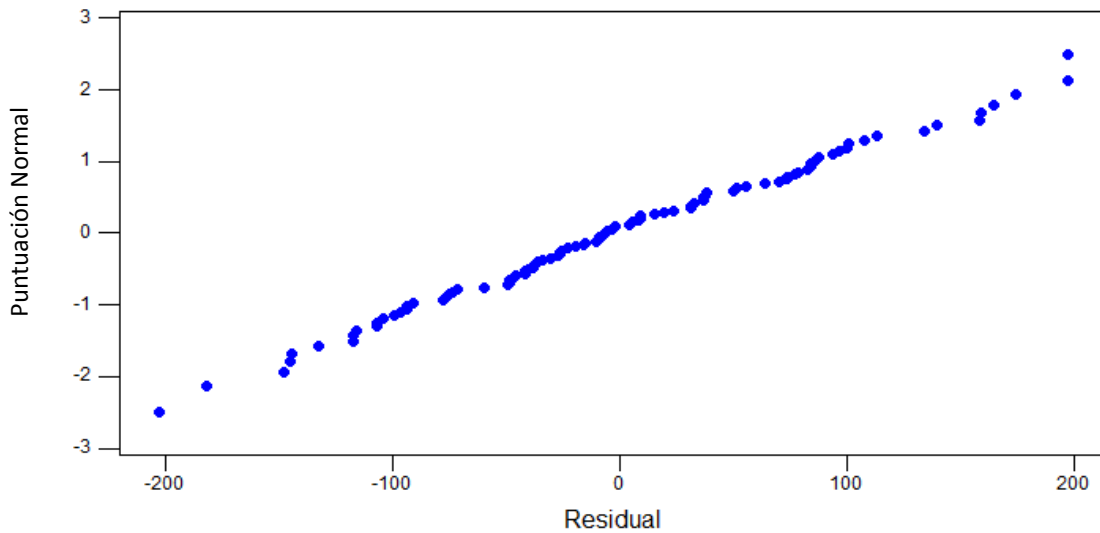
**Cuadro 22. Coeficientes de regresión para la predicción de grasa de la leche.**

Predictor	Coef	SE	T	P
Constante	-1886	3691	-0.51	0.611
ENL	-78.7	957.7	-0.08	0.935
EE	97.6	137.4	0.71	0.479
CNF	335.2	507.5	0.66	0.511
Hemicelulosa	208.8	171.4	1.22	0.227
Celulosa	475.1	221.3	2.15	0.035
Lignina	-38.2	133.4	-0.29	0.775
PDR	-327.7	148.1	-2.21	0.03
Arginina	-77.6	289.7	-0.27	0.79
Histidina	-409.4	405.3	-1.01	0.316
Isoleucina	729.4	864.9	0.84	0.402
Leucina	1723.4	718.5	2.4	0.019
Lisina	204.7	174.1	1.18	0.244
Metionina	-51.22	83.02	-0.62	0.539
Cisteina	-55.4	270.8	-0.2	0.839
Fenilalanina	-1599	948.5	-1.69	0.096
Treonina	-2243	1369	-1.64	0.106
Triptofano	729.7	459.1	1.59	0.116
Valina	1386	1035	1.34	0.185
Ca	-106.2	103.7	-1.02	0.309
P	-118.9	103	-1.15	0.252
Mg	88.54	79.96	1.11	0.272
K	239.8	108.1	2.22	0.03
Na	53.31	32.7	1.63	0.107
Cl	-125.1	70.87	-1.76	0.082
S	424.9	130.2	3.26	0.002

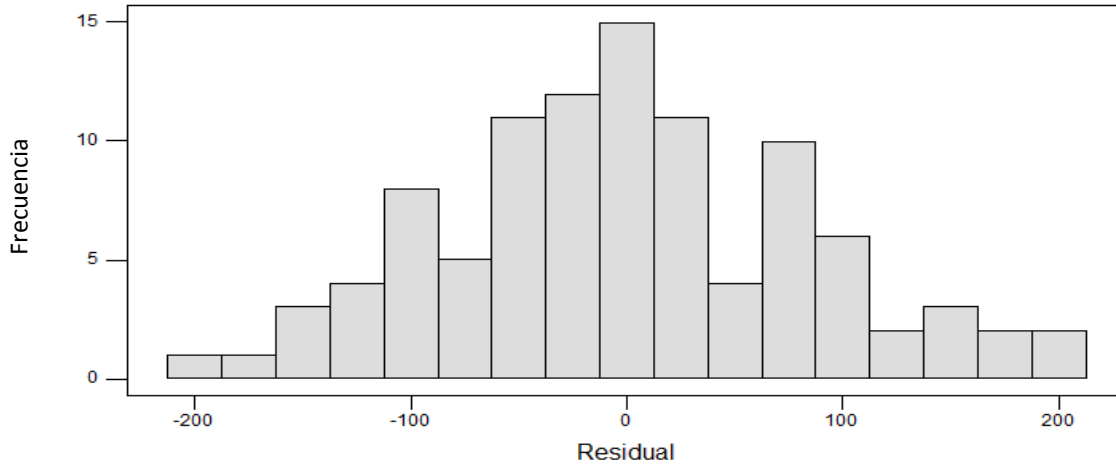
**Cuadro 23. Análisis de varianza para la predicción de grasa de la leche.**

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	25	3589241	143570	14.97	0
Error	74	709479	9588		
Total	99	4298720			

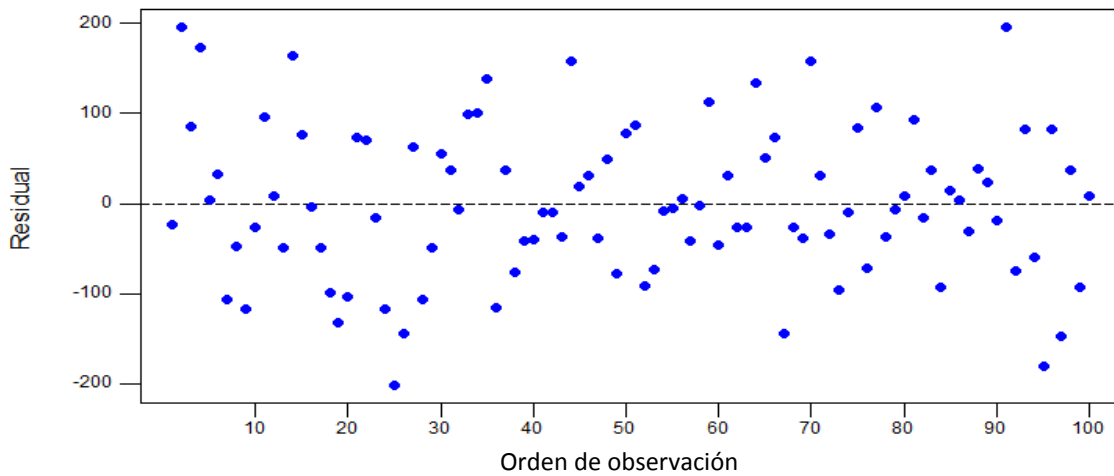
Los residuales del modelo de regresión presentaron una distribución normal (Figura 34 y 35) ( $P > 0.05$ ; Anderson-Darling), con media cero y varianza constante (Figura 36), cumpliendo con los supuestos para modelos lineales. De igual manera que los modelos de regresión anteriores, el modelo de regresión por mínimos cuadrados para la predicción de la cantidad de grasa producida en la leche no presenta sesgo por efecto del número de animales utilizados en los tratamientos, ni por la producción de grasa de leche reportada en los artículos (Figura 37 y 38), es decir, los residuales del modelo de regresión elaborado para la predicción de grasa láctea tienen un comportamiento similar para las diferentes producciones de grasa utilizadas en el desarrollo del modelo.



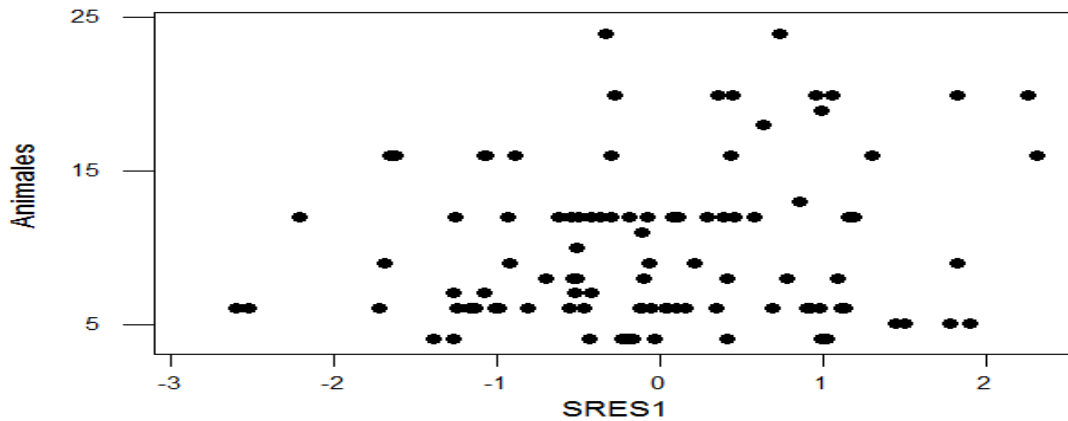
**Figura 34. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de grasa producida en la leche.**



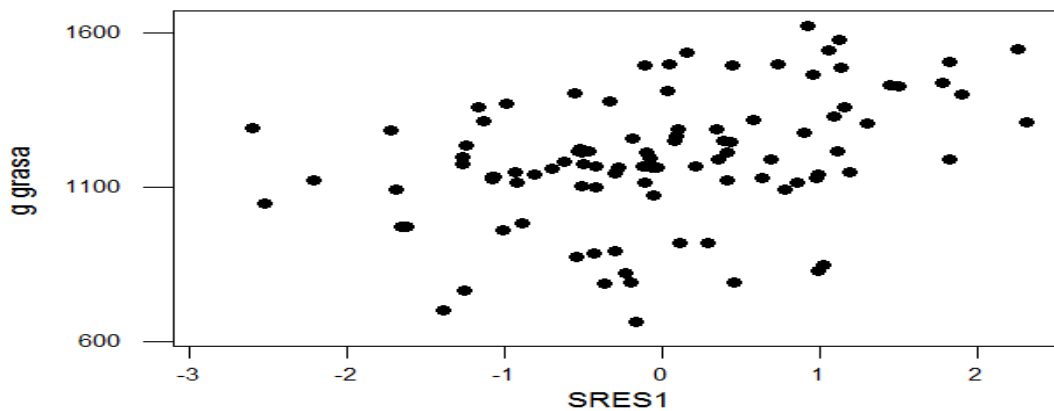
**Figura 35. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de grasa producida en la leche.**



**Figura 36. Dispersión de los residuales del modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de grasa producida en la leche contra el orden de observación.**



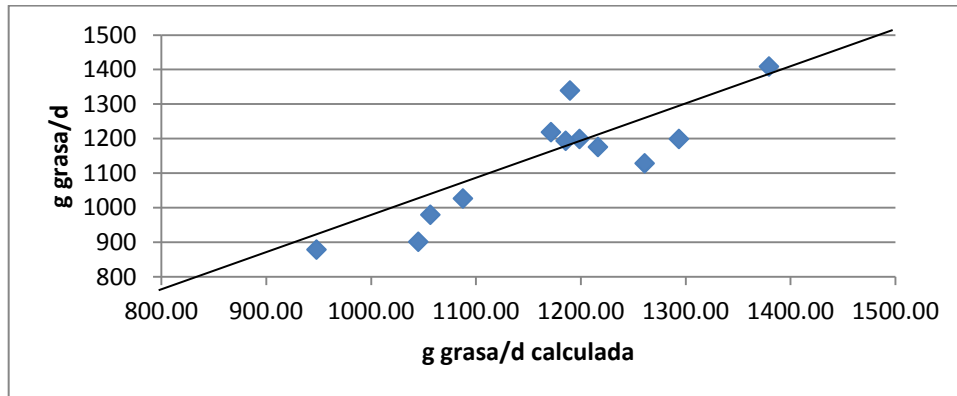
**Figura 37. Dispersión del número de animales por tratamiento contra los residuales estandarizados (SRES1).**



**Figura 38. Dispersión de la cantidad de grasa producida contra los residuales estandarizados (SRES1).**

Se probó el modelo contra los datos reportados en 13 dietas diferentes a las utilizadas para el desarrollo del modelo (Figura 39), y se encontró que la regresión tiene una  $R^2_{\text{predicción}}$  de 69.9 % y un  $MS_{\text{Error}}$  de 7369, similar al 9588 del cuadro 23 correspondiente al análisis de varianza de la elaboración del modelo de regresión, lo que quiere decir que la media de los residuales obtenidos en la elaboración del modelo es similar a la media de los residuales obtenidos en la validación del modelo con nuevos datos, por lo que el modelo de regresión para la predicción de grasa láctea

tiene un comportamiento similar con los nuevos datos que con los datos utilizados para la elaboración de la regresión.



**Figura 39. Cantidad de grasa producida en la leche observada en nuevos datos contra la cantidad de grasa en la leche predicha con el modelo elaborado.**

#### 6.4.4 Predicción de la producción de lactosa en la leche

Debido a que no todos los artículos reportaron el porcentaje de lactosa obtenido en la leche, para la realización del presente modelo de regresión se seleccionaron sólo los artículos que señalaban la cantidad de lactosa, el modelo obtenido se presenta en la ecuación EC 27 y sus características se describen en los cuadros 24 y 25.

$$\text{Lactosa g d}^{-1} = - 2522 - 573 \ln(\text{ENL}) + 36 \text{ LN}(\text{EE}) + 243 \text{ LN}(\text{CNF}) + 808 \text{ LN}(\text{Hemicel}) + 512 \text{ LN}(\text{Cel}) - 429 \text{ LN}(\text{Lig}) - 80 \text{ LN}(\text{PC-PNDR}) + 614 \text{ LN}(\text{Arg}) + 579 \text{ LN}(\text{His}) - 437 \text{ LN}(\text{Ile}) + 3679 \text{ LN}(\text{Leu}) + 820 \text{ LN}(\text{Lys}) - 11.9 \text{ LN}(\text{Met}) - 105 \text{ LN}(\text{Cys}) - 4179 \text{ LN}(\text{Phe}) - 3658 \text{ LN}(\text{Thr}) + 2308 \text{ LN}(\text{Trp}) + 540 \text{ LN}(\text{Val}) - 40 \text{ LN}(\text{Ca}) - 43 \text{ LN}(\text{P}) + 356 \text{ LN}(\text{Mg}) + 371 \text{ LN}(\text{K}) - 69.2 \text{ LN}(\text{Na}) + 409 \text{ LN}(\text{Cl}) - 150 \text{ LN}(\text{S})$$

$$S = 80.91 \quad R\text{-Sq} = 94.8\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 91.4\%$$

**EC 27. Regresión lineal para predecir la producción de lactosa en la leche.**

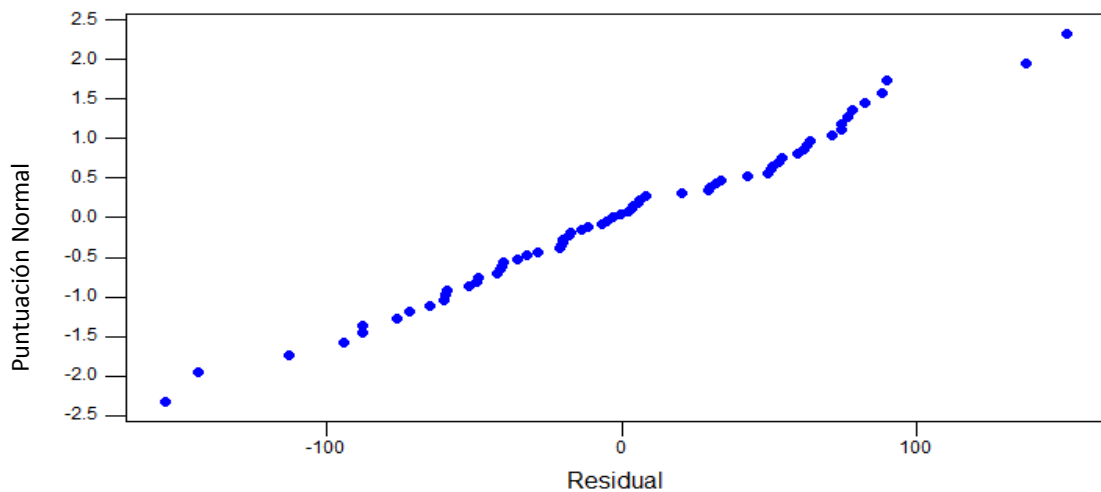
**Cuadro 24. Coeficientes de regresión para la predicción de lactosa**

Predictor	Coef	SE	T	P
Constante	-2522	4972	-0.51	0.615
ENL	-573	1350	-0.42	0.673
EE	35.9	196.6	0.18	0.856
CNF	243	670.8	0.36	0.719
Hemicelulosa	808.2	610.1	1.32	0.193
Celulosa	512.3	671.4	0.76	0.45
Lignina	-428.5	507.3	-0.84	0.403
PDR	-79.6	188.4	-0.42	0.675
Arginina	614.4	389.2	1.58	0.123
Histidina	578.6	968.5	0.6	0.554
Isoleucina	-437	1770	-0.25	0.806
Leucina	3679	1420	2.59	0.013
Lisina	819.9	693.2	1.18	0.244
Metionina	-11.87	90.98	-0.13	0.897
Cisteina	-105.2	350.2	-0.3	0.765
Fenilalanina	-4179	1399	-2.99	0.005
Treonina	-3658	3088	-1.18	0.243
Triptofano	2307.5	887.6	2.6	0.013
Valina	540	1577	0.34	0.734
Ca	-39.7	201.4	-0.2	0.845
P	-42.8	218.5	-0.2	0.846
Mg	355.7	155.5	2.29	0.028
K	370.5	180.5	2.05	0.047
Na	-69.2	73.53	-0.94	0.352
Cl	409.2	135.8	3.01	0.005
S	-149.9	323.1	-0.46	0.645

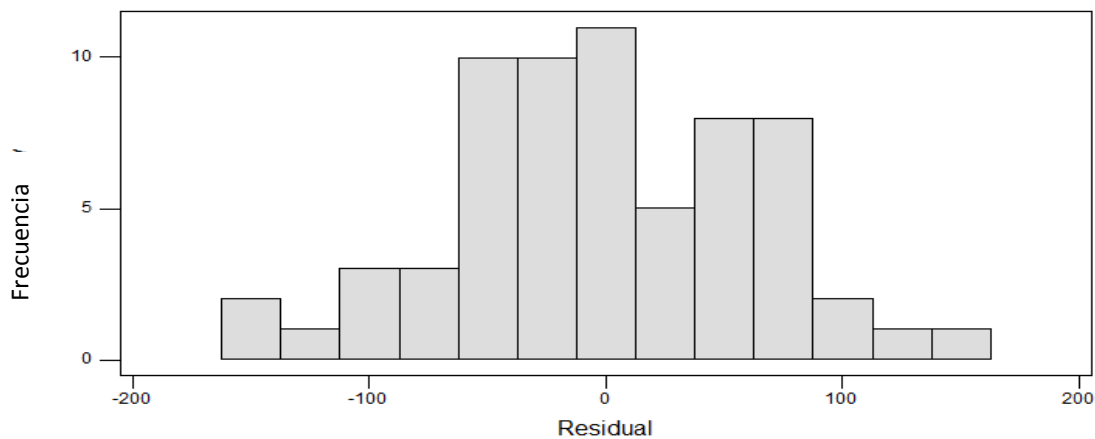
**Cuadro 25. Análisis de varianza para la predicción de lactosa**

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	25	4637612	185504	28.34	<0.001
Error	39	255301	6546		
Total	64	4892913			

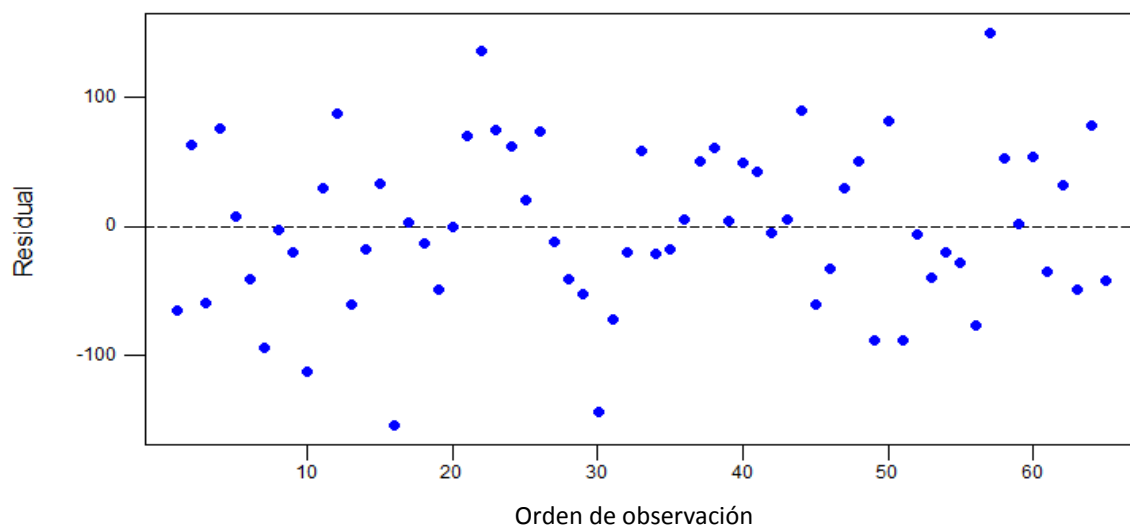
Los residuales del modelo de regresión tienen distribución normal (Figura 40 y 41) ( $P > 0.05$ ; Anderson-Darling), con media cero y varianza constante (Figura 42), cumpliendo con los supuestos para modelos lineales. El modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de lactosa en la leche por mínimos cuadrados no presentó sesgo por efecto del número de animales utilizados en los tratamientos, ni por la producción de lactosa reportada en los artículos (Figura 43 y 44), indicando que los residuales del modelo de regresión para la predicción de la lactosa tienen un comportamiento similar con las distintas producciones de lactosa utilizadas para el desarrollo del modelo.



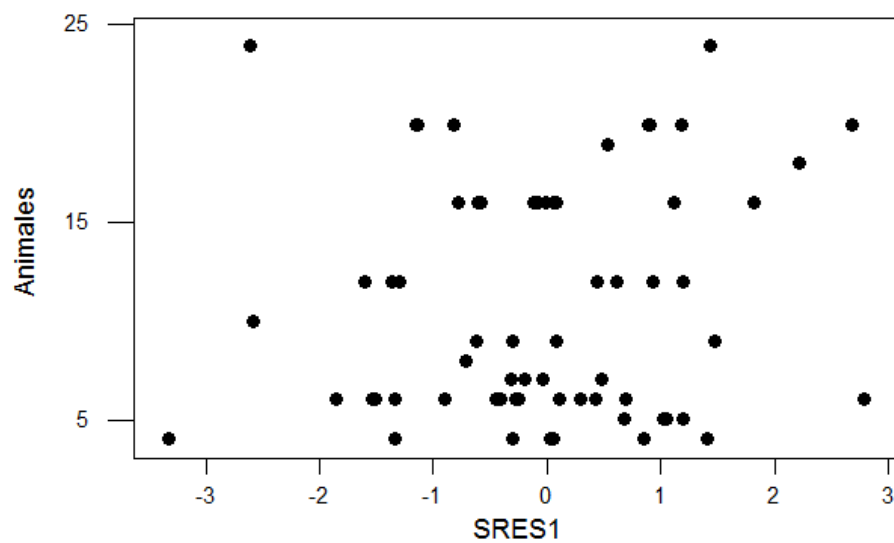
**Figura 40. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de lactosa en la leche.**



**Figura 41. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de lactosa en la leche.**

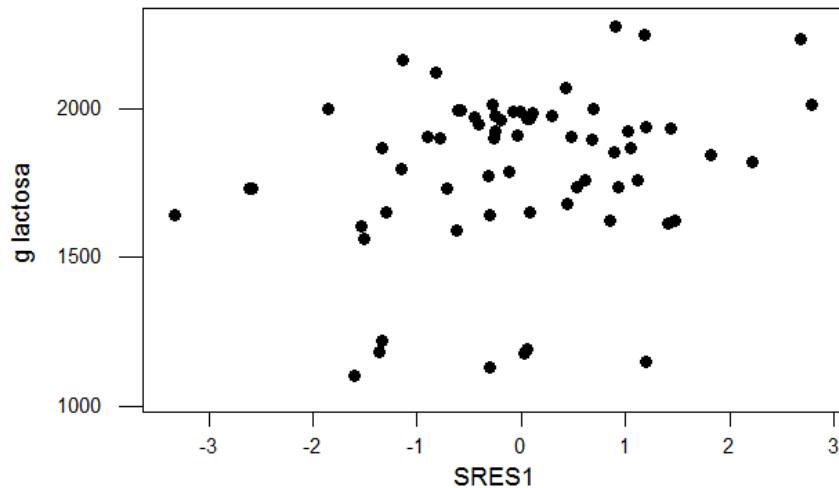


**Figura 42. Residuales del modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de lactosa en la leche contra el orden de observación.**



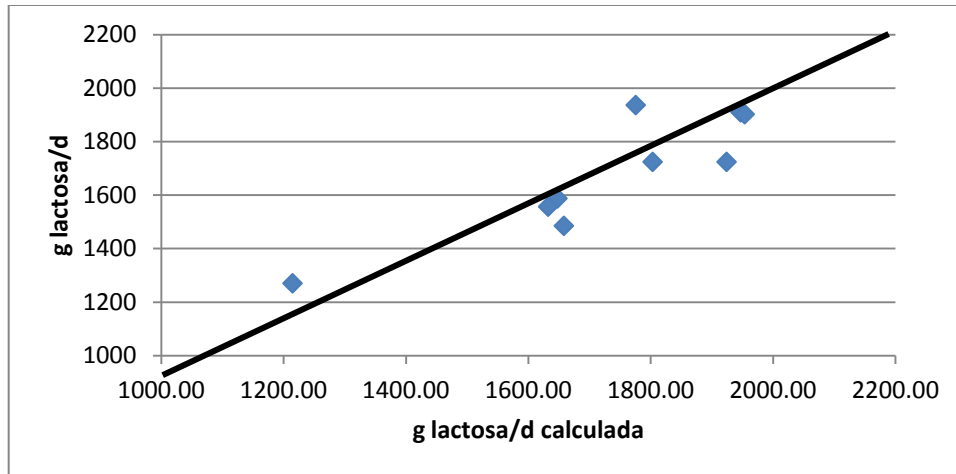
**Figura 43. Número de animales por tratamiento contra los residuales estandarizados (SRES1)**





**Figura 44. Cantidad de lactosa producida en leche contra los residuales estandarizados (SRES1).**

Se probó el modelo contra los datos reportados en nueve dietas distintas a las utilizadas para el desarrollo del modelo (Figura 45), y se encontró que la regresión tiene una  $R^2_{\text{predicción}}$  de 70.5 % y un  $MS_{\text{Error}}$  de 13147, resultando superior al valor reportado en el Cuadro 25 (6546) correspondiente al análisis de varianza de la elaboración del modelo de regresión, lo cual sugiere que la media de los residuales obtenidos en la elaboración del modelo es menor a la media de los residuales obtenidos en la validación del modelo, por lo que la regresión para la predicción de producción de lactosa no tuvo un comportamiento similar con los datos utilizados para el desarrollo del modelo que con los nuevos datos utilizados para la validación del modelo, efecto que se puede explicar por disminuir la cantidad de datos utilizados para el desarrollo del modelo, en comparación a las regresiones anteriores; además, al igual que en las regresiones anteriores, no se realizaron pruebas con animales, ni se utilizaron datos procedentes de artículos desarrollados en México para la realización del modelo, por lo que su aplicación en nuestro país pudiera tener mayor rango de error.



**Figura 45. Cantidad de lactosa en leche observada con nuevos datos contra la cantidad de lactosa predicha con el modelo elaborado.**

#### **6.4.5 Predicción de la producción de caseína en la leche**

De las 100 dietas utilizadas para la elaboración del modelo de regresión para predecir la cantidad de leche, grasa y proteína, tan sólo 31 de estas reportaron la cantidad de caseína presente en la leche, estos 31 datos se utilizaron para hacer una regresión, la cual se presenta EC 28 y sus características se describen en los cuadros 26 y 27.

$$\text{Caseína g d}^{-1} = 26656 - 673 \text{ LN(ENL)} + 78.4 \text{ LN(EE)} - 2276 \text{ LN(CNF)} - 159 \text{ LN(Hemicel)} - 3212 \text{ LN(Cel)} + 146 \text{ LN(Lig)} + 837 \text{ LN(PC-PNDR)} - 4213 \text{ ln(Arg)} + 15797 \text{ ln(His)} - 178 \text{ ln(Ile)} - 2881 \text{ LN(Leu)} + 244 \text{ LN(Lys)} - 54.6 \text{ LN(Met)} + 5747 \text{ LN(Cys)} - 15516 \text{ LN(Phe)} - 3992 \text{ LN(Thr)} - 6149 \text{ LN(Trp)} + 15430 \text{ LN(Val)} + 1238 \text{ LN(Ca)} - 4387 \text{ LN(P)} + 830 \text{ LN(Mg)} + 3523 \text{ LN(K)} + 954 \text{ LN(Na)} - 875 \text{ LN(Cl)} + 859 \text{ LN(S)}$$

$$S = 1.381 \quad R\text{-Sq} = 100.0\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 100.0\%$$

**EC 28. Regresión lineal para predecir la producción de caseína en leche.**

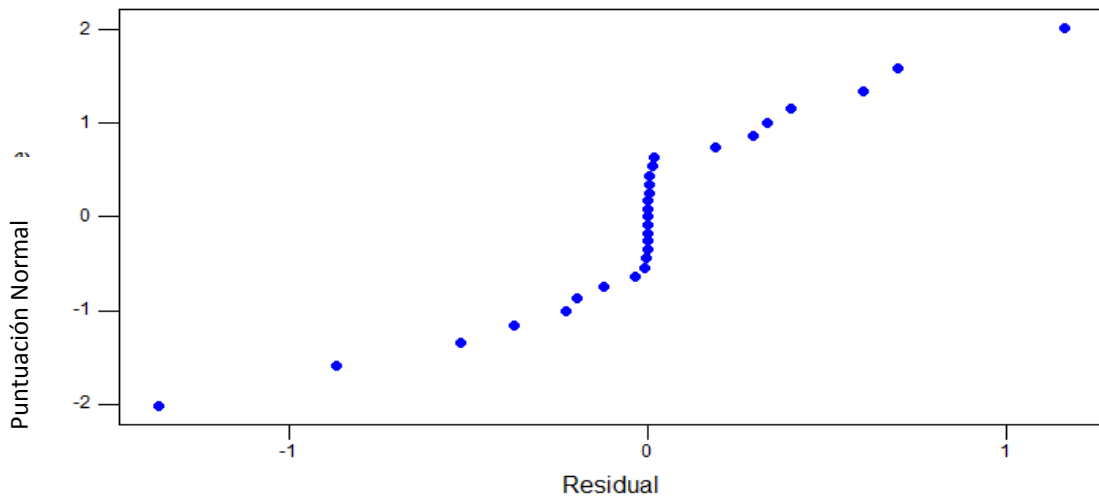
**Cuadro 26. Coeficientes de regresión para la predicción de caseína.**

Predictor	Coef	SE	T	P
Constante	26656	43214	0.62	0.581
ENL	-673.3	158.7	-4.24	0.024
EE	78.4	38.23	2.05	0.133
CNF	-2276	4085	-0.56	0.616
Hemicelulosa	-159	3317	-0.05	0.965
Celulosa	-3212	1546	-2.08	0.129
Lignina	146	1014	0.14	0.895
PNDR	837	3216	0.26	0.812
Arginina	-4213	3290	-1.28	0.29
Histidina	15797	5194	3.04	0.056
Isoleucina	-178	2722	-0.07	0.952
Leucina	-2881	6843	-0.42	0.702
Lisina	243.55	6.277	38.8	0
Metionina	-54.6	3.097	-17.63	0
Cisteina	5747	11943	0.48	0.663
Fenilalanina	-15516	11777	-1.32	0.279
Treonina	-3992	12546	-0.32	0.771
Triptofano	-6149	7787	-0.79	0.487
Valina	15430	5163	2.99	0.058
Ca	1238	3191	0.39	0.724
P	-4387	323.5	-13.56	0.001
Mg	829.7	213.7	3.88	0.03
K	3523.3	759.8	4.64	0.019
Na	954.3	609.2	1.57	0.215
Cl	-875	1361	-0.64	0.566
S	859.5	342.1	2.51	0.087

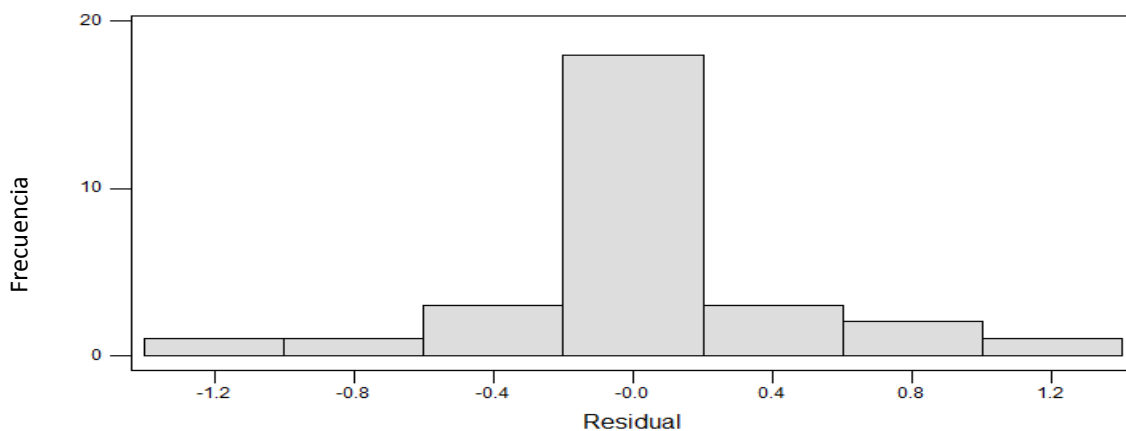
**Cuadro 27. Análisis de varianza para la predicción de caseína.**

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	25	752471	30099	15786	0
Error	3	6	2		
Total	28	752477			

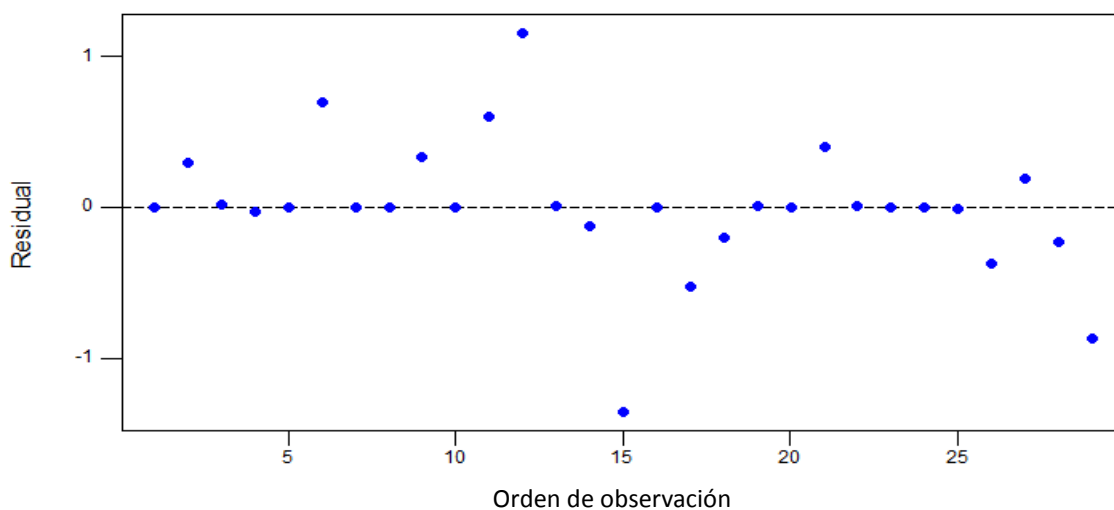
Los residuales del modelo de regresión tiene distribución normal (Figura 46 y 47) ( $P > 0.05$ ; Anderson-Darling), con media cero y varianza constante (Figura 48), por lo que cumple con los supuestos para modelos lineales. El modelo de regresión por mínimos cuadrados para la predicción de la cantidad de caseína en leche, no presenta sesgo por efecto de la caseína reportada en los artículos (Figura 49), lo que quiere decir que los residuales tienen un comportamiento similar bajo las distintos niveles de producción de caseína utilizadas para el desarrollo del modelo.



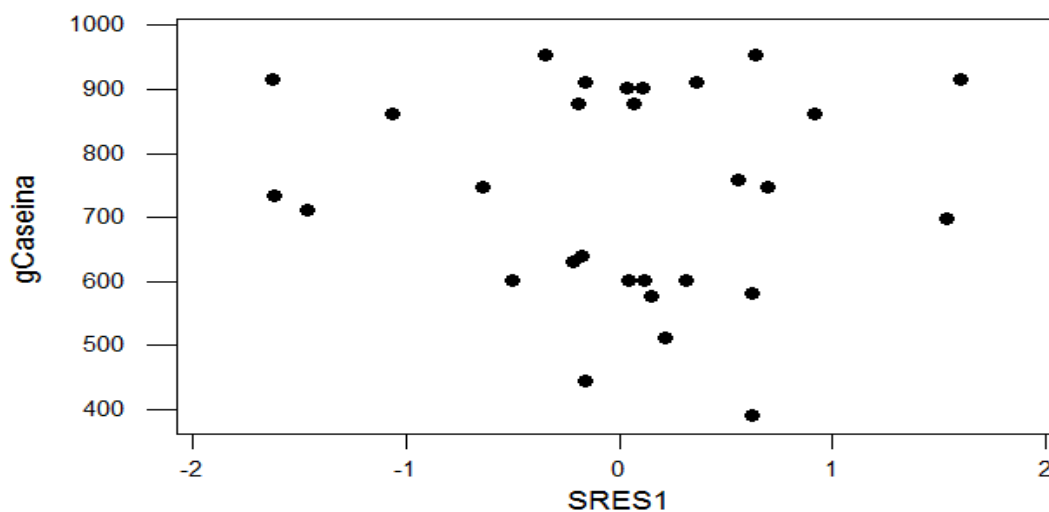
**Figura 46. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de caseína en leche.**



**Figura 47. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de caseína en leche.**



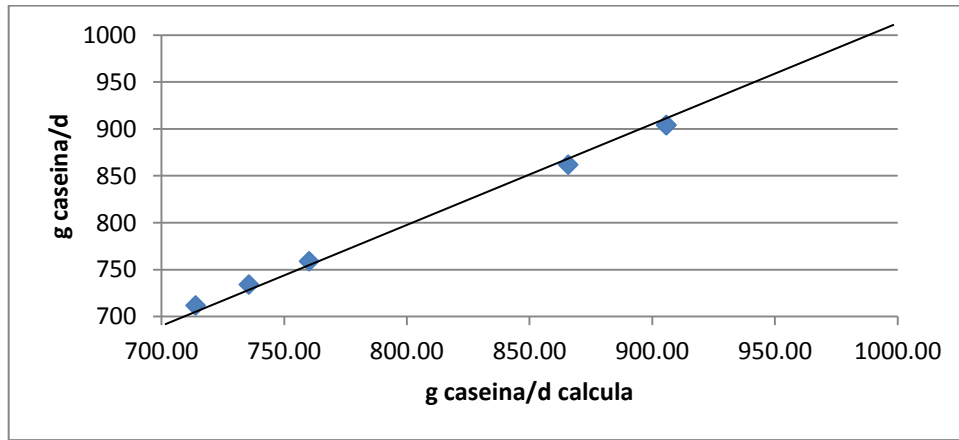
**Figura 48. Dispersión de los residuales del modelo de regresión desarrollado para predecir la cantidad de caseína en leche contra el orden de observación.**



**Figura 49. Dispersión de la cantidad de caseína producida en leche observada contra el residual estandarizado (SRES1).**

Además, se realizó una prueba del modelo usando cinco datos nuevos donde los resultados predichos por el modelo se ajustaron a los obtenidos con los nuevos datos (Figura 50); sin embargo, fueron pocos los datos utilizados para la elaboración del modelo y para su validación, además no se realizaron pruebas con animales, ni datos

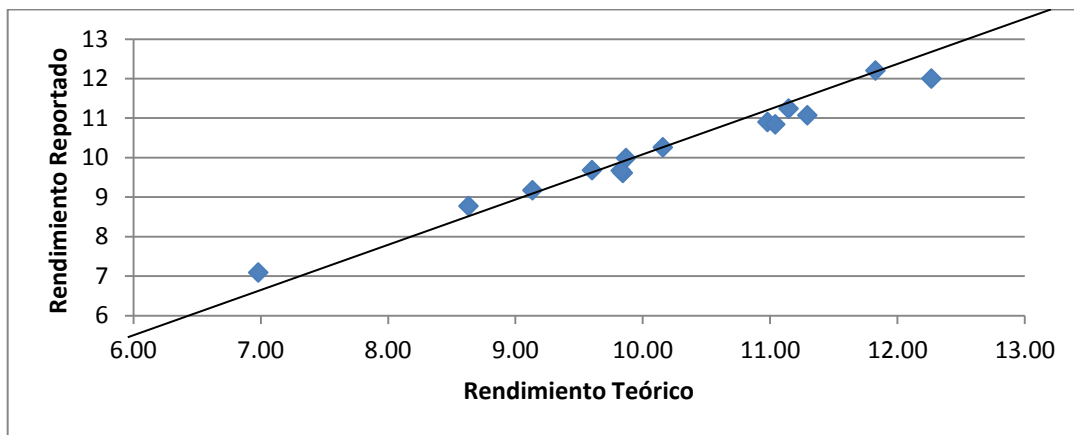
procedentes de artículos realizados en México, por lo que es probable que dicha ecuación tenga mayor variación si se aplicara bajo las condiciones de nuestro país.



**Figura 50. Cantidad de caseína en leche observada en nuevos datos contra la cantidad de caseína predicha con el modelo elaborado.**

#### 6.4.6 Predicción del rendimiento del queso

Para predecir el rendimiento del queso fresco se usó la fórmula de VanSlyke (EC 9) y su ajuste fue verificado con 14 datos de distintas muestras de leche, obteniéndose una  $R^2_{predicción}$  de 98.1 % (Figura 51).



**Figura 51. Rendimiento observado con nuevos datos contra el rendimiento predicho con el modelo elaborado.**

La ecuación de Van Slyke es una de las más utilizadas en la industria para predecir el rendimiento del queso cheddar; sin embargo, no considera los sólidos totales de la leche, ni el tratamiento térmico brindado a esta, previo a la elaboración del queso, además fue diseñada para queso cheddar, por lo que para su aplicación en nuestro país sería necesario adecuarla a diferentes quesos mexicanos.

#### **6.4.7 Predicción del consumo de materia seca**

Para desarrollar el modelo de regresión para la predicción del consumo de materia seca por día, se utilizaron los valores de la concentración de cada ingrediente en la dieta, en porcentaje, y para el caso de la energía neta de lactancia se expresó en megacalorías por kilogramo, además se incluyó la variable de peso vivo; de esta manera se obtuvo el modelo que se presenta en la EC 29, con las características detalladas en los cuadros 28 y 29.

Consumo, kg MS d<sup>-1</sup> = - 119 + 17.7(ENL) + 0.101 (EE) + 0.623 (CNF) + 0.54 (Hemicel) + 1.37 (Cel)+ 0.246 (Lig) + 0.939 (PC-PNDR) + 18 (Arg) – 103 (His) – 99.5 (Ile)+ 7.8 (Leu) + 3 (Lys) – 4.3 (Met) – 50.5 (Cys) – 25 (Phe) + 148 (Thr)+ 57.2 (Trp) + 12.4 (Val) + 2.95 (Ca) – 0.61 (P) – 0.38 (Mg) + 2.08 (K) + 8.29 (Na)- 3.94 (Cl) – 8.3 (S)+ 0.0544 (PV)

$$S = 1.545 \quad R\text{-Sq} = 76.9\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 68.6\%$$

#### **EC 29. Regresión lineal para el consumo de materia seca**

**Cuadro 28. Coeficiente de regresión para la predicción del consumo de materia seca**

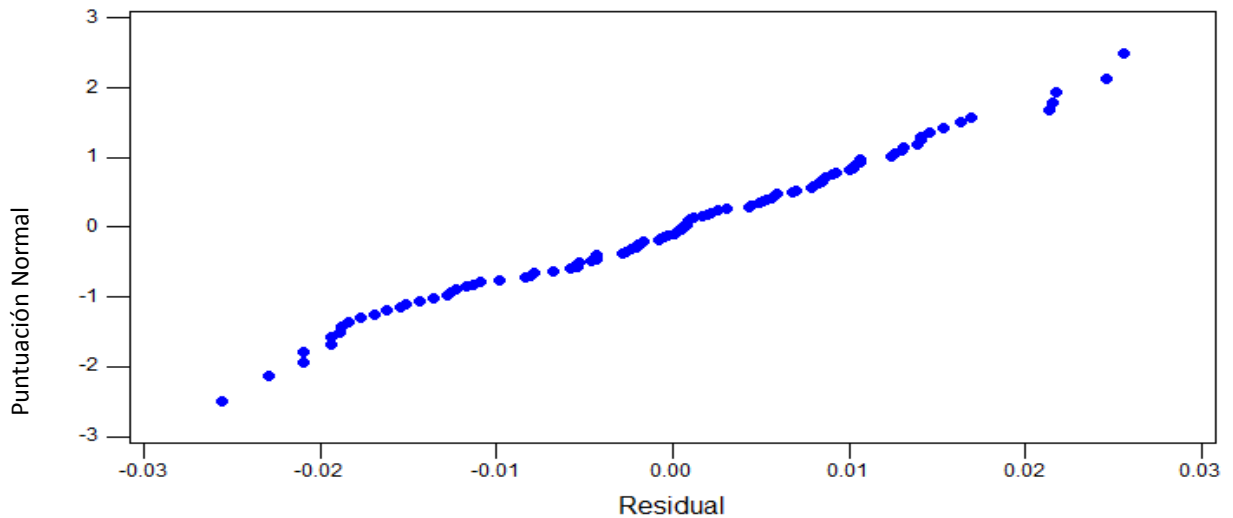
<b>Predictor</b>	<b>Coef</b>	<b>SE</b>	<b>T</b>	<b>P</b>
Constante	-118.9	32.9	-3.61	0.001
ENL	17.655	7.271	2.43	0.018
EE	0.101	0.4401	0.23	0.82
CNF	0.623	0.3485	1.79	0.078
Hemicel	0.54	0.3926	1.37	0.173
Cell	1.365	0.3162	4.32	0
Lig	-0.246	0.6951	-0.35	0.724
PDR	0.939	0.2841	3.31	0.001
Arg	17.953	9.223	1.95	0.055
His	-102.6	34.34	-2.99	0.004
Ile	-99.5	31.3	-3.18	0.002
Leu	7.77	14.09	0.55	0.583
Lys	2.98	10.33	0.29	0.774
Met	4.33	10.18	0.43	0.672
Cys	-50.48	34.19	-1.48	0.144
Phe	25.04	37.12	0.67	0.502
Thr	147.58	48.53	3.04	0.003
Trp	-57.2	60.43	-0.95	0.347
Val	12.42	28.83	0.43	0.668
Ca	2.951	2.121	1.39	0.168
P	-0.607	3.351	-0.18	0.857
Mg	-0.38	3.624	-0.1	0.917
K	2.08	0.8446	2.46	0.016
Na	8.295	4.021	2.06	0.043
Cl	-3.944	3.18	-1.24	0.219
S	8.26	10.4	0.79	0.43
PV	0.054	0.0081	6.72	0

**Cuadro 29 Análisis de varianza para la predicción del consumo de materia seca**

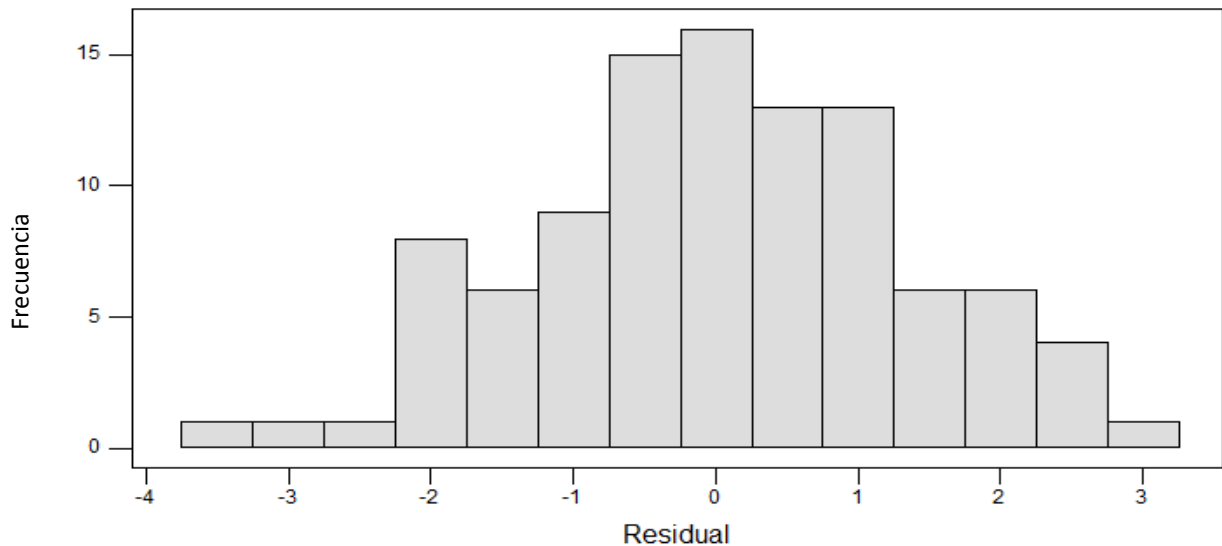
<b>Fuente</b>	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regresión	26	578.679	22.257	9.32	0
Error	73	174.297	2.388		
Total	99	752.976			



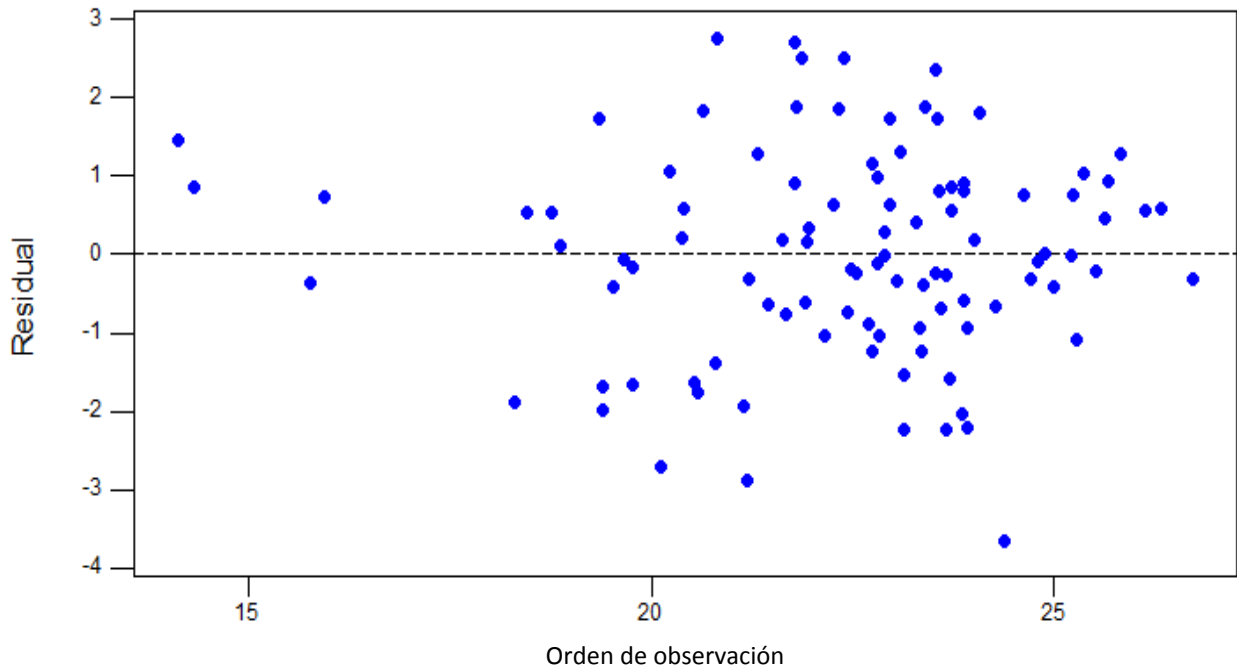
Los residuales del modelo de regresión lineal por mínimos cuadrados para la predicción del consumo de materia seca presentaron una distribución normal ( $P > 0.05$ ; Anderson-Darling), como se observa en la Figura 52 y 53; además, se observó una varianza constante y media cero (Figura 54), con lo que se cumplen los supuestos para modelos lineales.



**Figura 52. Normalidad para el modelo de regresión desarrollado para predecir el consumo de materia seca**



**Figura 53. Residuales para el modelo de regresión desarrollado para predecir el consumo de materia seca.**



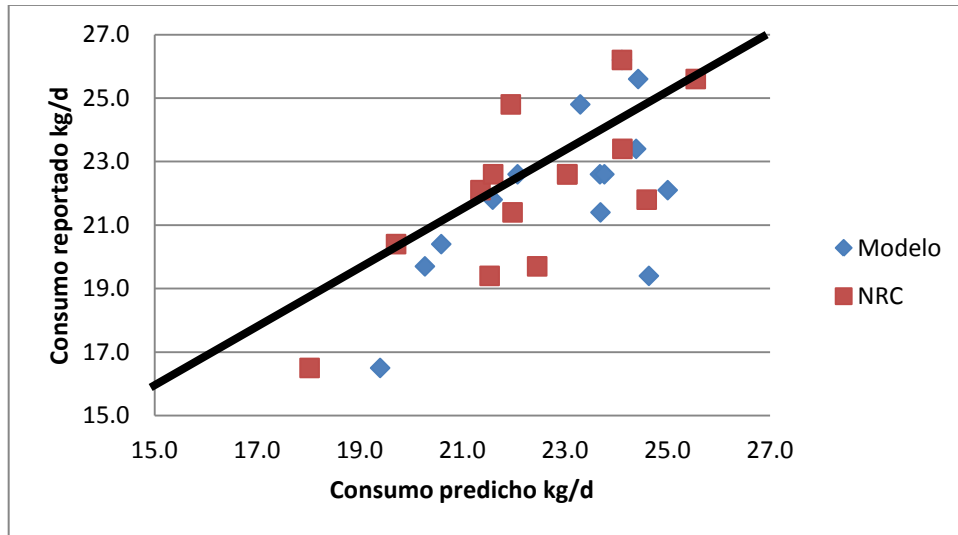
**Figura 54. Residuales del modelo de regresión desarrollado para predecir el consumo de materia seca contra el orden de observación.**

Se realizó una prueba del modelo con 14 datos nuevos (Figura 55), donde se observó una  $R^2_{\text{predicción}} = 77.7\%$  y  $MS_{\text{Error}}$  de 4.27, superior a la señalada en el cuadro 29 correspondiente al análisis de varianza de la elaboración del modelo, sin embargo la  $R^2_{\text{predicción}}$  es superior a la  $R^2$  de la elaboración del modelo, por lo que se concluye que la media de los residuales obtenidos en la elaboración del modelo es similar a la media de los residuales obtenidos en la validación del modelo con nuevos datos.

Además se compararon los resultados contra los obtenidos con la ecuación del NRC( 2001) para ganado lechero, usando como dato para obtener el consumo, la producción real de leche y se calculó con base a la producción de leche al 3.5 % de grasa; de esto se observó que la ecuación del NRC para ganado bovino lechero se ajusta mejor a los datos de la prueba; sin embargo, para utilizar la ecuación del NRC se requiere introducir la cantidad de leche que se produce, y para calcular la cantidad de leche que se produce, se requiere introducir la cantidad de alimento consumido, implicando que en el modelo del NRC, el consumo depende de la cantidad de leche

que se produce y esta a su vez depende de la cantidad de alimento que se consume entrando en conflicto una ecuación con la otra, haciendo necesario suponer el consumo o la producción para obtener el resultado; en el caso de la validación del modelo elaborado se utilizó el dato real de producción de leche permitiendo un mejor ajuste de la ecuación.

Al igual que con las regresiones anteriores, no se realizaron pruebas con animales, ni con datos procedentes de artículos realizados en México, por lo que la ecuación elaborada para la predicción del consumo voluntario de materia seca pudiera tener un mayor rango de error si se aplicara en nuestro país.



**Figura 55. Consumo observado en nuevos datos contra el consumo predicho con el modelo desarrollado.**

Donde el valor del NRC se calculó con base a la ecuación EC 30.

$$CMS (kg/d) = \left( 0.372 * \left( 0.4 * Leche(kg/d) + 15 * (\%Grasa Láctea * Leche(kg/d)) \right) + 0.0968 * PV^{0.75} \right)$$

**EC 30. Modelo de predicción del consumo de materia seca del NRC (2001) para ganado bovino productor de leche**

(CMS: consumo diario de materia seca, Leche: producción de leche al día, PV: Peso vivo).

## 6.5 Modelo completo

El modelo completo se basa en la utilización de la composición química de la dieta y el peso vivo del animal para obtener el consumo de materia seca esperado (EC 28); Con el consumo de materia seca se calcula el consumo de cada nutriente sobre peso metabólico (EC14) con el cual se calcula la producción de leche (EC17), proteína de la leche (EC18) grasa de la leche (EC 19), lactosa (EC 20) y caseína (EC 21), los cuales son usados para predecir el rendimiento del queso (EC 9) como lo describe la Figura 56 y los Cuadros 30 y 31.

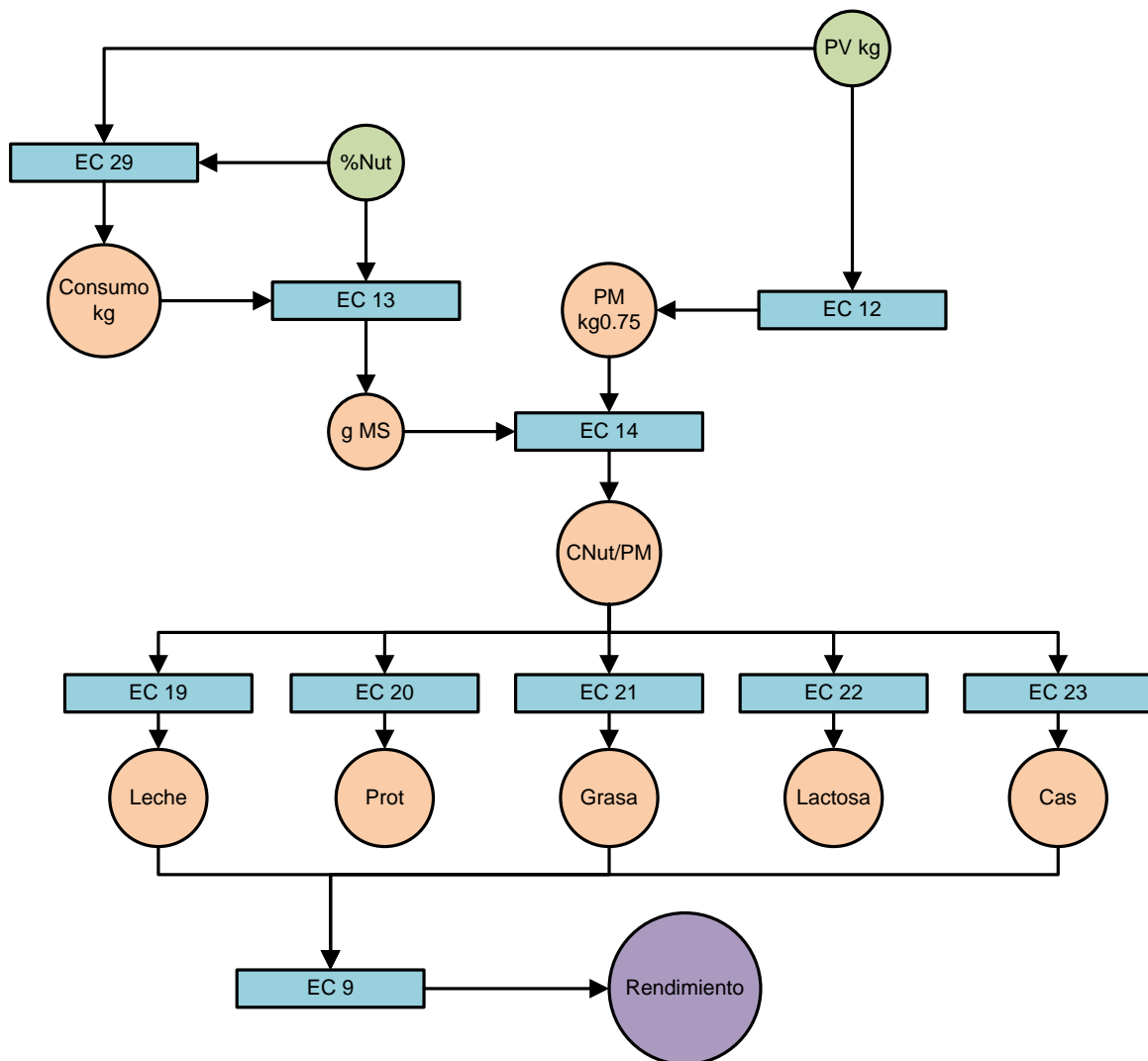


Figura 56 Esquema del modelo matemático desarrollado para predecir el rendimiento del queso a partir de los datos nutrimentales de la dieta.

**Cuadro 30 Resumen de fórmulas del modelo desarrollado completo**

Ecuación	Descripción
EC 9	$\text{Rendimiento} = (0.93 * \%Grasa + \%caseína - 0.1) * \frac{1.09}{[(100 - \%Humedad)]/100}$
EC 12	$PM_{ij} = (PV_{ij})^{0.75}$
EC 13	$CN_{kij} = (\%N_k)(C_{ij})$
EC 14	$CN_k/PM_{ij} = \frac{(MS_{ij})(N_{kij})}{PM_{ij}}$
EC 19	$\text{Leche} \frac{\text{kg}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{EE^{6.3}NFC^{8.7}Hem^{6.9}Cel^{20.2}Arg^{0.3}His^{20.9}Leu^{30.9}Lys^{0.1}Cys^{4.6}Trp^{25}P^{3.8}Mg^{7.6}Cl^{6.9}}{NEL^{2.3}Lig^{5.48}(CP - RUP)^{4.28}Ile^{3.4}Met^{0.2}Phe^{43.7}Thr^{36.2}Val^5Ca^{5.5}K^{1.5}Na^2S^{7.29}} \right] - 34.8$
EC 20	$\text{Prot} \frac{\text{g}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{NEL^{368}EE^{121}NFC^{177}Hem^{267}Cel^{390}His^{687}Ile^{199}Leu^{655}Lys^{55}Met^{5.6}Cys^{86}Trp^{996}Val^{355}P^{209}Mg^{151}Cl^{250}}{Lig^{137}(CP - RUP)^{201}Arg^{31}Phe^{1467}Thr^{1556}Ca^{270}K^{0.8}Na^{102}S^{63.3}} \right] + 780$
EC 21	$\text{Grasa} \frac{\text{g}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{EE^{98}NFC^{335}Hem^{209}Cel^{475}Ile^{729}Leu^{1723}Lys^{205}Trp^{730}Val^{1386}Mg^{88.5}K^{240}Na^{53.3}S^{425}}{NEL^{79}Lig^{38}(CP - RUP)^{328}Arg^{78}His^{409}Met^{51.2}Cys^{55}Phe^{1599}Thr^{2243}Ca^{106}P^{119}Cl^{125}} \right] - 1886$
EC 22	$\text{Lactosa} \frac{\text{g}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{EE^{36}NFC^{243}Hem^{808}Cel^{512}Arg^{614}His^{579}Leu^{3679}Lys^{820}Trp^{2308}Val^{540}Mg^{356}K^{371}Cl^{409}}{NEL^{573}Lig^{429}(CP - RUP)^{80}Ile^{437}Met^{11.9}Cys^{105}Phe^{4179}Thr^{3658}Ca^{40}P^{43}Na^{69.2}S^{150}} \right] - 2522$
EC 23	$\text{Caseína} \frac{\text{g}}{\text{d}} = \ln \left[ \frac{EE^{78.4}Lig^{146}(CP - RUP)^{837}His^{15797}Lys^{244}Cys^{5747}Trp^{6149}Val^{15430}Ca^{1238}Mg^{830}K^{3523}Na^{954}S^{859}}{NEL^{673}NFC^{2276}Hem^{159}Cel^{3212}Arg^{4213}Ile^{178}Leu^{2881}Met^{54.6}Phe^{15516}Thr^{3992}P^{4387}Cl^{875}} \right] + 26656$
EC 29	Consumo MS, Kg d <sup>-1</sup> = - 119 + 17.7(ENL) + 0.101 (EE) + 0.623 (CNF) + 0.54 (Hemicel) + 1.37 (Cel)+ 0.246 (Lig) + 0.939 (PC-PNDR) + 18 (Arg) – 103 (His) – 99.5 (Ile)+ 7.8 (Leu) + 3 (Lys) – 4.3 (Met) – 50.5 (Cys) – 25 (Phe) + 148 (Thr)+ 57.2 (Trp) + 12.4 (Val) + 2.95 (Ca) – 0.61 (P) – 0.38 (Mg) + 2.08 (K) + 8.29 (Na)- 3.94 (Cl) – 8.3 (S)+ 0.0544 (PV)

**Cuadro 31 Pasos a seguir para la obtención del rendimiento del queso usando el modelo desarrollado completo**

<b>PASOS</b>	<b>Descripción</b>
PASO 1	Con el peso vivo se calcula el peso metabólico (EC 12)
PASO 2	Con la composición química y el peso vivo se calcula el consumo de materia seca (EC 28)
PASO 3	Con el consumo de materia seca y la composición química se calcula el consumo de cada nutriente sobre peso metabólico (ENL, EE, CNF, Hemicel, Cel, Lig, PC-PNDR, Arg, His, Ile, Leu, Lys, Met, Cys, Phe, Thr, Trp, Val, Ca, P, Mg, K, Na, Cl, S (EC 13 y EC 14)
PASO 4	Se calcula la producción de leche (EC 17) y la composición química de la leche (EC 18,19,20 y 21)
PASO 5	Se calcula el rendimiento del queso (EC 9)

### 6.5.1 Evaluación del comportamiento del sistema del modelo elaborado

Se realizó una evaluación del comportamiento del sistema del modelo elaborado con un diseño uno a la vez; se utilizaron como entradas en el modelo los valores promedio de cada uno de las variables en la base de datos y se varió el contenido de extracto etéreo (EE), carbohidratos no fibrosos (CNF), hemicelulosa (Hemi), proteína degradable en rumen (PDR) y peso vivo (PV) del animal; además, el contenido de energía se calculó con base a lo propuesto por el NRC (2001) para ganado lechero usando el contenido nutrimental de cada prueba.

En la Figura 57 se observa que el rendimiento del queso (kilogramos de queso con 37 % humedad /100 litros de leche), aumenta conforme se incrementa la concentración de carbohidratos no fibrosos, hemicelulosa y el peso vivo del animal, pero disminuye al incrementarse el contenido de extracto etéreo y proteína degradable en rumen, es decir, usando el modelo completo se observa que la composición química de la dieta y el peso vivo del animal afectan la composición química de la leche y en consecuencia, el rendimiento del queso.

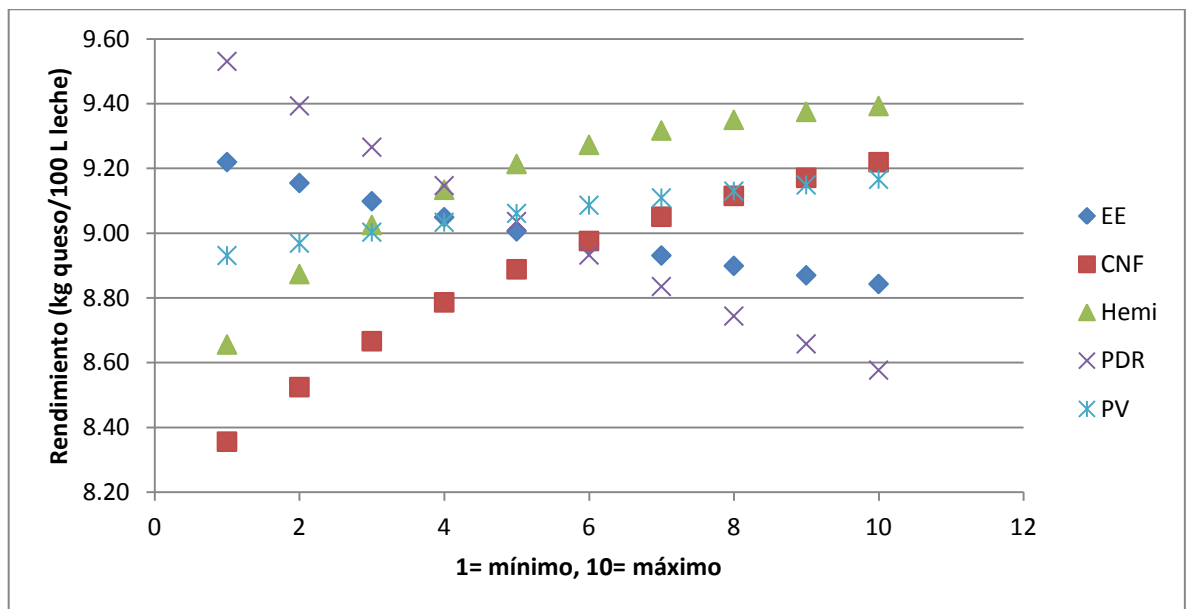
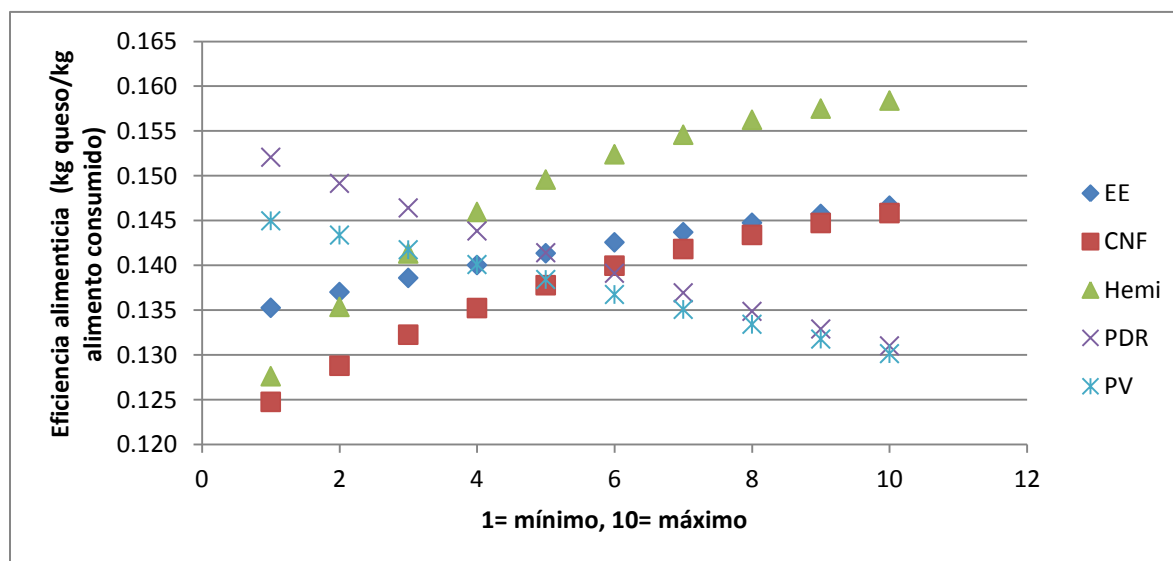


Figura 57. Evaluación del comportamiento del modelo completo para el rendimiento del queso.

Al analizar la eficiencia alimenticia medida a partir de los kilogramos de queso producido por kilogramos de alimento consumido, usando el modelo completo (Figura 58) se observa que aumenta la eficiencia conforme se incrementa la concentración de extracto etéreo, carbohidratos no fibrosos y hemicelulosa en la dieta, pero disminuye cuando aumenta la concentración de proteína degradable en rumen y el peso vivo del animal, es decir, a pesar de que aumenta el rendimiento a medida que incrementa el peso vivo del animal, disminuye su eficiencia, ya que aumenta también el consumo de alimento, de modo contrario para el extracto etéreo, a pesar de que disminuye el rendimiento del queso, conforme aumenta la concentración de extracto etéreo, aumenta la eficiencia ya que es mayor la producción de leche y por ende aumenta la producción de queso. Es decir, usando el modelo completo se observa que la composición química de la dieta y el peso vivo del animal afectan el consumo de alimento y la producción de leche y por consecuencia la eficiencia alimenticia de la vaca.



**Figura 58. Evaluación del comportamiento del modelo completo para la eficiencia alimenticia**



## 7. CONCLUSIONES

Usando el modelo completo elaborado, el rendimiento del queso y la eficiencia alimenticia en la producción de queso son sensibles a cambios en el contenido nutrimental de la dieta.

Con el uso del modelo desarrollado completo es posible predecir el consumo de alimento, la producción de leche, la composición química de la leche y el rendimiento del queso, lo que pudiera ayudar al diseño de programas de alimentación que mejoren la eficiencia alimenticia, permitiendo al productor de leche darle un valor agregado a su producto.

Sin embargo a pesar de que las ecuaciones que conforman el modelo parecen funcionar bien por separado, es necesario hacer estudios con animales que validen el modelo completo, además la ecuación utilizada para el rendimiento del queso fue diseñada para queso cheddar, por lo que es necesario adecuarla para cada tipo diferente de queso

## 8. RECOMENDACIONES

a) La ecuación de Van Slyke fue diseñada para la producción de queso chedar, se recomienda adecuarla para la predicción del rendimiento de quesos mexicanos.

b) No se encontraron artículos que mostraran la composición química de la dieta, la producción de leche, la composición química de la leche y el rendimiento de queso chedar, por lo que se recomienda hacer una prueba con animales variando el contenido nutrimental de la dieta, con el fin de validar el modelo completo.

c) En los resultados reportados por los artículos seleccionados no se observó un efecto significativo de los diferentes minerales sobre la producción de leche y la composición química de la leche por lo que sería recomendable profundizar su estudio para mejorar el modelo.

d) Utilizar las ecuaciones del modelo completo en programación lineal para el diseño de esquemas de alimentación que mejoren la eficiencia alimenticia de la vaca en relación a la producción de queso a un mínimo costo.

## 9. LITERATURA CITADA

Aleandri R. 1989. Evaluation of Milk for cheese production based on milk characteristics and formagraph measures. *J. Dairy Sci.* 72(8): 1967-1975

Akayezu J. M., Hansen W. P., Otterby D. E., Crooker B. A., Marx G. D. 1997. Yield response of lacting Holstein dairy cows to dietary fish meal or meat and bone meal. *J. Dairy Sci.* 80:2950-2963.

Annexstad R. J., Stern M. D., Otterby D. E., Linn J. G, Hansen W. P. 1986. Extruded Soybeans and corn gluten meal as supplemental protein sources for lacting dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 70:814-822.

Atwal A. S, Erfle J. D. 1991. Effects of feeding fish meal to cows on digestibility, milk production and milk composition. *J. Dairy Sci.* 75:502-507.

Atwal A. S, Mahadevan S., Wolynetz M. S. 1994. Increased milk production of cows in early lactation fed chemically treated soybean meal. *J. Dairy Sci.* 78:595-603.

Baldwin R. L. 2000. History and future of modeling nutrient utilization in farm animals. *Modelling Nutrient utilization in farm animals.* CAB International. EUA. 1-9 p.

Blaxter K. 1986. Bioenergetics and growth: the whole and the parts. *J. Dairy Sci.* 63:1-1.

Bertrand J. A., Pardue F. E., Jenkins T. C. 1998. Effect of ruminally protected amino acids on milk yield and composition of jersey cows fed whole cottonseed. *J. Dairy Sci.* 81:2215-2220.

Bingham N. H., Fry J. M. 2010. *Regression Lineal Models in Statistics.* Springer. EUA. 297 p.

Bowman J. M, Grieve D. G., Buchanan-Smith J. G., Mcleod G. K. 1987. Response of dairy cows in early lactation to sodium hydroxide-treated soybean meal. *J. Dairy Sci.* 71:982-989.

Brito A. F., Broderick G. A. 2007. Effects of different protein supplements on milk production and nutrient utilizaion in lacing dairy cows. *J. Dairy S.* 90: 1816-1827.

Broderick G. A., Craig W. M., Ricker D. B. 1993. Urea Versus true protein as supplement for lactating dairy cows fed grain plus mictures of alfalfa and corn silages. *J. Dairy Sci.* 76:2266-2274.

Broderick G. A., Stevenson M. J., Patton R. A., Lobos N. E., Olmos Colmenero J. J. 2008. Effect of supplementing rumen-protected methionin on production and nitrogen excretion in lacting dairy cows. *J. Dairy Sci.* 91:1092-1102.

Broderick G. A., Reynal S. M. 2009. Effect of source of rumen-degraded protein on production and ruminal metabolism in lacting dairy cows. *JDS* 92:2822-2834.

Broderick G. A., Stevenson M. J., Patton R. A. 2009. Effect of dietary protein concentration and degradability on response to rumen-protected methionine in lacting dairy cows. *J. Dairy Sci.* 92:2719-2728.

Brody S., Procter R. C. 1932. Growth and development with special reference to domestic animals: Further investigations of surface areas in energy metabolism. Univ of Missouri Res. EUA. 41 p.

Campbell M. K., Farrell S. O. 2004. *Bioquímica*. Thomson. 4 ed. México. 864 p

Canale C. J., Muller L. D., McCahon H. A., Whitsel T. J., Varga G. A., Lormore M. J. 1989. Dietary fat and ruminally protected amino acids for high producing dairy cows. *J. Dairy S.* 73:135-141.

CANILEC. Cámara nacional de industriales de la leche. 2012. Producción Nacional de leche. [http://www.canilec.org.mx/prod\\_leche.html](http://www.canilec.org.mx/prod_leche.html). consultada el día 14 de Noviembre de 2012.

Cherney D. J. R., Cherney J. H., Chase L. E. 2003. Influence of dietary nonfiber carbohydrate concentration and supplementation of sucrose on lactation performance of cows fed fescue silage. *J. Dairy Csi.* 86:3983-3991.

Church D. C. 1993. *The Ruminant Animal, Digestive Physiology and Nutrition*. Waveland Press In. EUA. 564 p.

Church D.C., Pond W. G., Pond K. R. 2004. México. *Fundamentos de Nutrición y Alimentación de Animal*. Limusa Wiley.

Clark J. H. 1974. Lactational Responses to Postruminal Administration of Proteins and Amino Acids. *J. Dairy Sci.* 58(8) 1178-97.

DePeters E.J., Taylor S. J., Franke A. A., Aguirre A. 1984. Effects of feeding whole cottonseed on composition of milk. *J. Dairy Sci.* 68:897-902.

DePeters E. J., Taylor S. J., Baldwin R. L. 1989. Effect of dietary fat in isocaloric rations on the nitrogen content of milk from Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 72:2949-2957.

DePeters E. J., Cant J. P. 1992. Nutritional Factors Influencing the Nitrogen Composition of Bovine Milk: a Review. *J. Dairy Sci.* 75:2043-2070.

Donald J, McMahon, Rodney J, Brown. 1983. Enzymic Coagulation of Casein Micelles: A review. *J. Dairy Sci.* 67: 919-92.

Emery R. S. 1977. Feeding for Increased Milk Protein. *J. Dairy Sci.* 61 (6): 825-828.

Ernstrom C. A., Brown R. J. Abu-Tarboush H., Majeed G. 1981. The value of milk used for mozzarella and swiss cheese. *Jersey J.* 28 (4): 49-51.

Feng P., Hoover W. H., Miller T. K., Blauwiel R. 1993. Interactions of fiber and nonstructural carbohydrates on lactation and ruminal function. *J. Dairy Sci.* 76:1324-1333.

Gósta B. 1995. Dairy Processing Handbook. Tetra Pak Processing Systems A. B. 287-230 p.

Guinard-Flament J., Delamaire E. P., Lamberton P., Peyraud J. L. 2007. Adaptations of mammary uptake and nutrient use once daily Milking and feed restriction in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 90:5062-5072.

Hristov A. N., Price W. J., Shafill B. 2005. A meta-Analysis on the relationship between intake of nutrients and body weight with milk volume and milk protein yield in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 88:2860-2869.

Hoffman P. C., Grummer R. R., Shaver R. D., Broderick G. A., Drendel T. R. 1991. Feeding supplemental fat and undergraded intake protein to early lactation dairy cows. *J. Dairy Sci.* 74:3468-3474

Kai Y., El-Haik B. S., 2009. Taguchi's Orthogonal Array Experiments. Design for six sigma. Mc Graw-Hill.

Leonardi C., Stevenson M., Armentano L. E. 2003. Effect of two levels of crude protein and methionine supplementaion on performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86:4033-4042

Leonardi C., Bertics S., Armentano L. E. 2005. Effect of increasing oil from distillers grains or corn oil on lactaion performance. *J. Dairy Sci.* 88:2820-2827

Littell J. H. 2008. Systematic Reviews and Metha-Analysis. Oxford University Press. EUA. 216 p

Lyons L. C. 1997. Meta-analysis: Methods of Accumulating Results Across Research

Domains. Manassas.

Marziali A. S, Ng-Kwasi-Hang KF. 1986. Effects of Milk Composition and Genetic Polymorphism on Coagulation Properties of Milk. *J. Dairy Sci.* 69 (7):1793.

McMahon D. J, Borwn R. J. 1984. Enzymic Coagulation of Casin Micelles: A review. *J. Dairy Sci.* 67:919-929.

McMahon D. J, Oommen B. S. 2008. Supramolecular Structure of the Casein Micelle. *J. Dairy Sci.* 91:1709-1721.

Mickelsen R., Ernstrom C. A .1967. Factors Affecting Stability of rennin. *J. Dairy Sci.* 50: 645-65.

Moe P. W., Reid J. T., Tyrrell H. F. 1965. Effect of level of intake on digestibility of dietary energy by high-producing cows. *J. Dairy Sci.* 48: 1053-1061.

Montgomery D.C., Peck E., Vining G.. 2000. Introducción al análisis de regresión lineal. 3er ed. CECSA. 590 p.

Morrison R. T., Neilson R. B. 1998. Química Orgánica. Pearson.

Nelson D. L, Cox M. M. 2009. Principios de Bioquímica: Lehninger. OMEGA. 5 ed. 225-282.

NRC. National Research Council.1987. Predicting feed intake of food-producing animals. National Academy Press. 96 p.

NRC. National Research Council. 2001. Nutrient requirements for Dairy Cattle. National Academy Press. Washington. 450 p.

NRC. National Research Council. 2005. Mineral Tolerance of Animals. National Academy Press. 510 p.

MTPE. Ministerio de trabajo y promoción del empleo. 2003. Elaboración de queso fresco. PROMPYME Gobierno de Perú.

Ortega G. C. N, 2006. Evaluación del modelo de NRC 1996 para ganado en pastoreo suplementado con caña de azúcar enriquecida. Tesis de Maestría en ciencias. Postgrado en Ganadería. Colegio de postgraduados.. 58 p.

Petrie A., Watson P. 2006. Statistics for Veterinary and Animal Science, Second Edition. Blackwell Publishing. 312 p.

Polan C. E., Cozzi G., Berzaghi P., Andrigetto I. 1995. A blend of animal and cereal protein or fish meal ad partial replacement for soybean meal in the diets of lacting

holstein cows. *J. Dairy Sci.* 80:160-166.

Ramirez R. G. 2003. *Nutrición de rumiantes en sistemas extensivos*. Trillas.

Reid J. T., Moe P. W., Tyrrell H. F. 1966. SYMPOSIUM: Re-Evaluation of nutrients allowances for high-Producing cows, Energy and protein requirements of milk production. *J. Dairy Sci.* 49: 215-223.

Rencher A. C., Schaalje G. B. 2008. *Linear Models in Statistics*. John Wiley and Sons Inc. 127-133 p.

Ruppert L. D., Drackley J. K., Bremmer D. R., Clark J. H. 2003. Effects of tallow in diets based on corn silage of alfalfa silage on digestion and nutrient use by lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86:593-609.

Shabi Z., Brucketal I., Zamwell S., Tagari H., Arieli A. 1998. Effects of extrusion of grain and feeding frequency on rumen fermentation, nutrient digestibility, and milk yield and composition in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 82:1252-1260.

Sutton J. D. 1989. Altering Milk Composition by Feeding. *JDS* 72(10): 2801-1.

SSA. Secretaria de Salud. 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-121-SSA1-1994, Bienes y servicios, Quesos: frescos, madurados y procesados. Especificaciones sanitarias.

Tackett V. L., Bertrand J. A., Jenkins T. C., Pardue F. E., Grimes L. W. 1995. Interaction of dairy fat and acid detergent fiber diets of lacting dairy cows. *J. Dairy Sci.* 79:270-275

Tedeschi L. O. 2005. Mathematical models in ruminant nutrition. *Sci. Agric.* 62.(1):76-91.

Tejada I. H. 1992. Control de calidad y análisis de alimentos para animales. Sistema de educación continúa en producción animal AC. 15-25 p.

Underwood E. J., Suttle N. F. 1999. *The mineral nutrition of livestock*. 3rd ed. Cab International. 544 p.

Valaderes F. S. C., Broderick G. A., Valadares R. F. D, Clayton M. K. 1999. Effect of replacing alfalfa silage with high moisture corn on nutrient utilization and milk production. *J. Dairy Sci.* 83:106-114

Wattiaux M. A., Armentano L. E. 1995. *Metabolismo de carbohidratos en vacas lecheras*. Esenciales lecheras. Instituto Babcock para la investigación y desarrollo de la

industria lechera. 9-12 p.

Wright T. C., Moscardini S., Luimes P.H., Susmel P., McBride B. W. 1998. Effects of Rumen-undegradable Protein and Feed Intake on Nitrogen Balance and Milk Protein Production in Dairy Cows. *J.Dairy Sci.* 81(3):784-93.

Zebeli Q., Dijkstra J. Tafaj M., Steingass H. 2008. Modeling the adequacy of dietary fiber in dairy cows based on the responses of ruminal pH and milk fat production to composition of the diet. *J. Dairy Sci.* 91 (5) 2046-2066.