

ANALISIS COMPARTAMENTAL COMO METODO INDIRECTO PARA DETERMINAR
ASIMILACION Y CONSUMO DE PASTO POR BOVINOS

Tesis de Grado de Magister Scientiae

Oswaldo Sanabria López

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación
Turrialba, Costa Rica

Diciembre, 1971

ANALISIS COMPARTAMENTAL COMO METODO INDIRECTO PARA DETERMINAR
ASIMILACION Y CONSUMO DE PASTO POR BOVINOS

Tesis

Presentada a la Escuela de Estudios para Graduados
como requisito parcial para optar al grado de

Magister Scientiae

en el

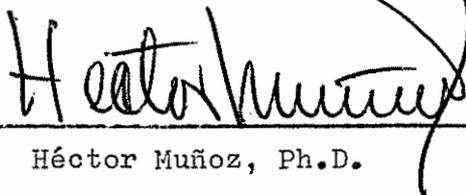
Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:



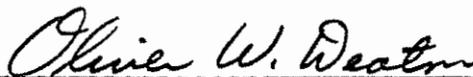
Consejero

Karel Vohnout, Ph.D.



Comité

Héctor Muñoz, Ph.D.



Comité

Oliver W. Deaton, Ph.D.



Comité

Jorge M. Montoya, Ph.D.

Diciembre, 1971

A Beatriz mi querida esposa
y a mis hijitas

Tatiana

Lenny

Gisela

A mis padres

BIOGRAFIA

El autor nació en Potosí, Bolivia el 13 de agosto de 1936. Realizó estudios secundarios en el Colegio Pichincha de Potosí y los universitarios en la Facultad de Agronomía de Cochabamba, graduándose como Ingeniero Agrónomo en 1961. Realizó estudios de especialización en lechería en Chile 1963 y en Dinamarca 1964 bajo auspicios de F.A.O.; asistiendo también al Centro Internacional de Educación en Lechería (IDEC) en Dinamarca en Mayo 1969.

Desde 1962 ocupó el cargo de Especialista en Ganadería de la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de San Simón de Cochabamba. En la Facultad de Agronomía de la misma universidad, desde 1961 ocupó cargos de ayudante de los cursos de Topografía, Zootecnia, Lechería y Sanidad Animal. En 1967 dictó el curso de Biometría y Estadística en forma interina y en 1968 fue nombrado profesor de Lechería. Ingresó como estudiante graduado al Departamento de Ganadería Tropical del IICA en setiembre de 1969, desempeñando al mismo tiempo el cargo de Asistente Graduado en los laboratorios de Fisiología y Nutrición Animal, concluyendo sus estudios en diciembre de 1971.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar sus agradecimientos al Dr. Karel Vohnout por su valiosa orientación en el estudio de la ciencia animal y a los miembros de su Comité Consejero Dres. Héctor Muñoz, Oliver Deaton y Jorge Montoya por sus enseñanzas y desinteresada colaboración.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	2
2.1. Métodos para estimar consumo de animales en pastoreo	2
2.1.1. Métodos para estimar digestibilidad aparente	3
2.1.2. Métodos para estimar digestibilidad verdadera	5
2.2. Uso de indicadores en estudios de digestibili- dad	7
3. MATERIALES Y METODOS	8
3.1. Localización	8
3.2. Manejo de animales	8
3.3. Muestreos	9
3.4. Método propuesto para estimar consumo de ali- mento y producción fecal	10
3.4.1. Modelo N ^o 1	11
3.4.2. Modelo N ^o 2	12
3.4.3. Modelo N ^o 3	14
3.4.4. Otros modelos Nos. 4, 5 y 6	15
3.5. Análisis de laboratorio	17
3.6. Análisis estadístico	18

	<u>Página</u>
4. RESULTADOS Y DISCUSION	19
4.1. Curvas de concentración del indicador	19
4.2. Predicción del consumo de forraje	25
4.3. Predicción de la producción fecal	27
4.4. Predicción de la asimilación	29
4.5. Consideraciones sobre la cinética del indica- dor	31
5. CONCLUSIONES	32
6. RESUMEN	33
7. SUMMARY	35
8. LITERATURA CITADA	37
APENDICE	40

LISTA DE CUADROS

Cuadro N ^o		<u>Página</u>
1	Precisión en la estimación de la concentración del indicador en función del tiempo en ingestas y heces fecales	24
2	Consumo medido y estimado según modelo 2. Kg por día	26
3	Evaluación de la predicción del consumo de materia seca usando el modelo 2	26
4	Producción fecal medida y estimada. Kg por día	27
5	Evaluación de la predicción de producción fecal	28
6	Asimilación medida y estimada con el modelo 2. Kg por día	30
7	Evaluación de la predicción de asimilación de materia seca usando el modelo 2	30

LISTA DE FIGURAS

Figura N ^o		<u>Página</u>
1	Modelo propuesto para estimar digestibilidad verdadera	11
2	Modelo propuesto para estimar consumo, digestibilidad aparente y producción fecal	12
3	Curva de concentración de indicador en heces con dosis única	17
4	Curvas de concentración de indicador de dosis única en 3 niveles de contenido ruminal.	19
5	Curva de concentración de indicador en ingestas para muestras compuestas. Dosis única .	20
6	Curva de concentración de indicador en el rumen para muestra compuesta. Dosis múltiple (2 por día)	21
7	Curva de excreción en heces fecales. Dosis única	22
8	Curva de excreción en heces fecales. Dosis múltiple	22
9	Curvas de concentración en ingestas para dosis múltiple, una vez por día	23
10	Comportamiento de indicador y velocidad de excreción de acuerdo al vehículo de administración	25

DEFINICIONES

Conc.	=	Concentración
C.V.	=	Coefficiente de variabilidad
D	=	Digestibilidad de alimento consumido
g	=	gramos
Ic	=	Indicador consumido
If	=	Indicador fecal
Ingesta	=	alimento ingerido
M.S.	=	Materia seca
MSc	=	Materia seca consumida
MSf	=	Materia seca fecal
M 2	=	Modelo N ^o 2
M 3	=	Modelo N ^o 3
M 4	=	Modelo N ^o 4
M 5	=	Modelo N ^o 5
M 6	=	Modelo N ^o 6

1. INTRODUCCION

El valor nutritivo de un alimento puede estimarse mediante análisis químico (insumo), por la respuesta del animal (producto) ó mediante pruebas de laboratorio in vitro. El análisis químico es el método más simple pero no mide el aprovechamiento que el animal puede hacer del alimento. Por consiguiente, la respuesta del animal constituye el método más adecuado para su evaluación. Sin embargo, las medidas de ganancia de peso, producción de leche y otras medidas de producción, si no se observan ciertas condiciones estandarizadas pueden constituir una evaluación del animal y no del alimento. Por ejemplo, crecimiento compensatorio o el uso de animales que han dejado de crecer darán resultados completamente distorsionados, pues no se incluye el gasto del animal en su mantenimiento. Por tanto la mejor evaluación sería en términos de energía neta; sin embargo, a la fecha presente no se cuenta con métodos suficientemente fáciles y precisos para hacer determinaciones de energía neta. Las dificultades anotadas hacen necesaria la búsqueda de otros enfoques para estimar el valor nutritivo de los alimentos. Una alternativa puede ser la determinación de consumo de nutrimentos y un refinamiento adicional será la determinación de la digestibilidad verdadera.

Los objetivos del presente estudio son:

- I. Poner a prueba experimental un método para determinar consumo y asimilación del pasto, fundamentado en el análisis compartamental y el uso del óxido crómico como indicador externo.
- II. Desarrollar un método que permita estimar cuantitativamente el forraje consumido por animales en pastoreo.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Métodos para estimar el consumo de los animales en pastoreo

Se ha hecho considerable esfuerzo para mejorar las técnicas que permitan estimar consumo de animales en pastoreo, y se han propuesto varios métodos tales como los agronómicos o directos y los indirectos basados en la producción fecal y la digestibilidad.

El método directo agronómico, consiste en medir el pasto antes y después del pastoreo. Se conocen muchas técnicas, como la de la diferencia cuando se mide el consumo de parcelas protegidas y la técnica sin diferencia o de un solo corte utilizado en potreros abiertos (25). Estas técnicas son objetadas principalmente por el efecto del animal sobre el pasto (11) y por el pastoreo selectivo que ocasiona errores de muestreo (11, 24).

El método indirecto estima el consumo como producto del volumen de heces fecales y de la digestibilidad del alimento, usando la relación: $MSc = (MSf \times 100) / (100 - D)$

donde: MSc = materia seca consumida; MSf = materia seca fecal y D = digestibilidad del alimento. Este método, considerado como el de mayor precisión, tiene su principal fuente de error en el cálculo de digestibilidad (24). La materia fecal que puede medirse directamente en bolsas colectoras es laboriosa con animales en pastoreo y el uso de indicadores no siempre da resultados semejantes a los medidos directamente, debido a una mezcla desigual con el alimento (24) y a las variaciones de excreción y recobro en la recolección (10, 17).

El consumo es una de las características más importantes en el estudio de la valoración de alimentos. Sin embargo, su estimación está sujeta a muchos factores de variación. Estos factores son la composición química y física del alimento, la variación genética de los animales, manejo y factores ambientales (23, 25).

2.1.1. Métodos para estimar digestibilidad aparente

La digestibilidad de los pastos puede determinarse directamente midiendo el consumo y la producción fecal y también indirectamente mediante métodos que pueden agruparse en: técnicas de relación, de índices fecales y de microdigestión ó in vitro.

Las técnicas de relación usadas con más frecuencia, se basan en el uso de indicadores internos (naturales) ó externos, y la medida de la relación entre la concentración del indicador consumido (I_c) y su concentración en las heces (I_f) dá el valor de la fracción no digerible del alimento. La digestibilidad se obtiene restando de la unidad el valor del material indigestible calculado. En este método se han usado como indicadores, hierro, sílice, cromógenos, lignina, nitrógeno no asimilable. Las predicciones más precisas han sido obtenidas con el uso de lignina y nitrógeno (3, 25, 29). Estas técnicas usan animales fistulados para obtener las muestras. El error está en la suposición de que los animales intactos consumen igual que los fistulados. Otras desventajas son la contaminación de las muestras con saliva y otros productos digestivos, pérdida de constituyentes solubles del forraje y diferencia de comportamiento fisiológico entre animales sanos y fistulados (3). Además de los

problemas anotados se presentan inconvenientes de falta de selectividad por vaciado del rumen y finalmente recuperaciones de indicador en las heces del 100 por ciento no siempre se obtienen en ensayos de campo (24, 29).

Las técnicas de índices fecales estiman la digestibilidad mediante ecuaciones de regresión obtenidas con el consumo de pasto y la concentración de sustancia indicadora en las heces de los animales en estabulación. Se supone que el resultado obtenido es el mismo con los animales en pastoreo como en los usados para muestreo en estabulación. El método usa muchos indicadores como el nitrógeno, los cromógenos, fibra fecal, fracción soluble de heces, lignina, celulosa; habiéndose obtenido los mejores resultados con el nitrógeno y los cromógenos por la mayor predictibilidad (3, 12, 29). La técnica tiene muchos inconvenientes, principalmente el suponer que todos los animales estabulados que sirvieron para producir las ecuaciones de regresión se comportan igual que los de pastoreo. No considera la selección de pasto por los animales en pastoreo (29) y se supone que los valores de digestibilidad de las muestras de pasto cortado son los mismos que los valores de digestibilidad del pasto que los animales consumen en el potrero (24).

Las técnicas in vitro ó de microdigestión, utilizadas por su rapidez y facilidad, se basan en comparaciones entre la digestibilidad in vivo y la digestibilidad in vitro, para lo cual, al igual que en el método anterior, se deben desarrollar ecuaciones de predicción. Tiene muchas objeciones, como la suposición de que la digestibilidad in vitro debe ser igual que la digestibilidad in vivo tanto para el

forraje consumido en estabulación como para el pastoreado (24, 29). También se supone que la correlación de ambas técnicas no está influenciada por las diferentes fuentes de inóculo. Además no se considera la selectividad del animal en pastoreo (29). Por las estandarizaciones que requiere este método, se considera aún en etapa de desarrollo (3, 23, 30) aunque en algunos estudios se lograron correlaciones altas ($r^2 = 0,98$) entre los valores predecidos y los obtenidos con método convencional (2, 30). Sin embargo, el método no es repetible de un laboratorio a otro (25).

Finalmente entre los métodos indirectos, por su facilidad se cita la predicción de digestibilidad por la composición química del alimento (6, 24, 26). La baja predictibilidad es la mayor objeción de este método, y la máxima fuente de error es la suposición de que la relación de digestibilidad y composición química es lineal para todos los componentes (26); además que los datos de composición usados en los cálculos son generalmente de ambientes diferentes (24).

2.1.2. Métodos para estimar digestibilidad verdadera

Para determinar la digestibilidad verdadera, es necesario conocer los que se denominan "productos metabólicos fecales" (PMf) que son los residuos no absorbidos de los jugos digestivos junto con la expulsión de la mucosa intestinal (19, 21) y que se colecta junto con las heces fecales. Para medir PMf existen métodos que pueden agruparse en directos, indirectos, in vitro y mediante el uso de isótopos.

Los métodos directos miden la excreción del nutrimento en heces

de animales alimentados con dietas libres de dicho nutrimento. En el caso del nitrógeno endógeno, el aporte para vacunos se calcula en 0,27 a 0,53 gramos por cada 100 gramos de materia seca consumida (21). Este método tiene el inconveniente de que la alimentación libre de algún principio nutritivo afecta la fisiología del animal y en el caso de los rumiantes es difícil determinar la desaparición del nutrimento porque algunos alimentos permanecen más tiempo que otros en los compartimientos digestivos (1).

Los métodos indirectos, consisten en administrar el nutrimento a varios niveles de consumo y expresar la excreción fecal como una función de consumo; la extrapolación a un valor de consumo cero debe dar el valor endógeno (6, 21). El peligro de este enfoque está en el uso de la extrapolación para encontrar los valores de PMf, pues no se sabe el comportamiento de la función matemática utilizada fuera del dominio de dicha función.

Se han propuesto métodos basados en predicciones de digestibilidad mediante fermentaciones in vitro basados en conocimiento de valores in vivo pero que aún se requiere de mayores estudios (21, 25). La objeción a este método es que requiere de una enorme estandarización que muchas veces es incompatible con la situación real.

La mayor precisión en la determinación de PMf se obtiene mediante el uso de isótopos, ya sea introduciéndolos al torrente sanguíneo o marcando alimentos ingeridos con isótopos estables como el N^{14} , N^{15} , C^{12} , C^{13} que pueden medirse en un espectrómetro de masa (19) ó radioactivos como el C^{14} , I^{131} , P^{32} (19, 21) que se detectan con un contador Geiger o en Cámara de ionización (19). Este método

es difícil y requiere de equipo y personal especializado. Tiene aplicación muy limitada porque el uso de isótopos debe ser controlado.

2.2. Uso de indicadores externos en estudios de digestibilidad

El uso de indicadores en estudios de digestibilidad eliminó la tarea de colección total y permitió estimar digestibilidad con cifras semejantes a las observadas (13, 28). El indicador para tal efecto debe ser atóxico, inerte, indigestible y de excreción regular. El indicador externo más usado para la determinación de digestibilidad aparente ha sido el óxido crómico (10, 20, 27, 28) por la mayor precisión de los resultados (28, 32) en comparación con otros indicadores. Se han propuesto muchos vehículos, tales como la harina de trigo, yeso dental, cápsulas de gelatina, aceite (3, 7, 14).

Aunque su uso presenta estos aspectos objetables, el método propuesto por Corbet et al. (7) impregnando el Cr_2O_3 en papel Kraft, ha permitido recuperaciones de indicador cercanas e iguales al 100 por ciento (17, 32), una distribución uniforme en el rumen y una excreción fecal uniforme (7). La ventaja del método está en que el papel impregnado semeja las condiciones físicas del alimento tosco de las raciones (7, 15).

Otros indicadores externos usados con menos frecuencia son el óxido de hierro (76 - 82% de recuperación), sílice (85 - 99% de recuperación) (29) y el polietileno de glicol (PEG) con variación de excreción entre 40 y 60 por ciento en comparación con Cr_2O_3 que solo fue de 10 por ciento (8).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Localización

El estudio se realizó en las instalaciones del departamento de Ganadería Tropical del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O.E.A. ubicado en Turrialba, Costa Rica a 600 metros s.n.m. con 2,500 mm de precipitación pluvial anual, 22°C de temperatura ambiental y 90 por ciento de humedad relativa.

3.2. Manejo de animales

El presente estudio se dividió en 2 fases. En la primera se analizó datos de campo y laboratorio disponibles (22) de 80 animales que recibieron una dosis única y dosis múltiples de óxido de cromo como indicador en 2 diferentes vehículos (harina y papel molido).

En la segunda fase, se analizaron resultados de 12 animales fistulados al rumen con pesos entre 150 y 400 Kg. Estos animales recibieron ad libitum pasto Pangola (Digitaria decumbens) a las 8 y 17 horas. Seis animales repartidos en 3 grupos de acuerdo al peso, recibieron una dosis única de 27, 41 y 55 g de óxido crómico en papel Kraft*(7). Seis animales igualmente repartidos en 3 grupos según sus pesos (150, 250 y 400 Kg) recibieron diariamente 9 y 18 g de óxido de cromo administrados 2 veces por día con intervalo de

* Importado de Rowett Research Institute, Bucksburn, Aberdeen, Scotland.

12 horas durante 5 días consecutivos. El óxido crómico se administró en la forma de papel cromado en tiras, directamente al rumen a través de la fístula. El bolo se colocó a la altura de la entrada del esófago. Las dosis y forma de administración se determinaron en ensayos pilotos.

La colección de heces, se hizo mediante arneses con bolsas colectoras, midiéndose la producción fecal 2 veces por día. Para evitar la contaminación de las heces con orinas en el caso de las hembras, se utilizaron láminas de plástico que se colocaron entre la vulva y la bolsa de colección.

3.3. Muestreos

La toma individual de muestras de pasto ofrecido y rechazado se realizó 2 veces por día a las 6 y 18 horas, registrándose al mismo tiempo el consumo y rechazo por día. El muestreo de ingestas se hizo durante los 5 días que comprende cada período, tomando alícuotas de las zonas superficial, media y profunda del rumen para tiempo de 2, 4, 6, 8, 10, 12 y cada 12 horas hasta 108 horas, seguidas a la dosificación y conservando absoluta individualidad. Estas muestras fueron congeladas inmediatamente y conservadas para los análisis correspondientes. El tiempo de muestreo así como las zonas y forma de muestrear fueron fijados con ensayos exploratorios previos. Las heces fecales se muestrearon para horas 6, 12 y cada 12 horas hasta 108 horas después de dosificar el indicador, tomando muestras individuales directamente del recto.

Para comparar los resultados del ensayos con el método conven-

cional se tomaron además muestras de heces durante los días 5^o al 10^o posteriores a la dosificación del indicador, registrándose en dicho lapso de tiempo los datos de producción fecal 2 veces por día.

3.4. Método propuesto para estimar consumo de alimento y producción fecal

El método propuesto para estimar consumo y producción fecal, se basa en un análisis matemático compartamental del sistema digestivo y supone que alimento e indicador (Cr_2O_3) fluyen simultáneamente y tienen la misma cinética de excreción. Para el presente trabajo se utilizaron 3 modelos o enfoques diferentes cuya solución matemática requiere conocer las curvas de excreción del indicador en las heces y la de concentración en ingestas.

3.4.1. Modelo N^o 1

La Figura 1 ilustra el modelo propuesto para estimar digestibilidad verdadera con las rutas seguidas por el indicador (línea sólida) y el alimento (línea punteada).

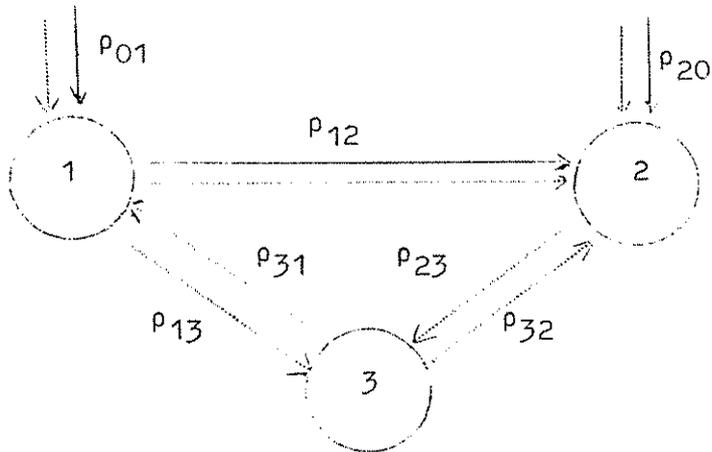


Fig. 1. Modelo propuesto para estimar digestibilidad verdadera.

1 = Compartimiento ruminal

2 = Compartimiento gastro-intestinal

3 = Compartimiento vascular

P_{ij} = Tasas de intercambio entre compartimientos, Kg/hora

M_i = Contenido del compartimiento i. Kg.

Las ecuaciones diferenciales para describir el modelo son:

$$\frac{dY_1}{dX} = \frac{(\rho_{10} + \rho_{13} - \rho_{12}) Y_1}{M_1} - \frac{\rho_{31} \cdot Y_3}{M_2}$$

$$\frac{dY_2}{dX} = \frac{\rho_{12} Y_1}{M_1} + \frac{(\rho_{23} + \rho_{20}) Y_2}{M_2} - \frac{\rho_{32} Y_3}{M_2}$$

$$\frac{dY_3}{dX} = - \frac{\rho_{13} Y_1}{M_1} - \frac{\rho_{23} Y_2}{M_3} + \frac{(\rho_{31} + \rho_{32}) Y_3}{M_3}$$

en que:

Y_i = Variable dependiente, concentración del indicador en función del tiempo.

X = Variable independiente, tiempo

Integrando las funciones anteriores se obtiene:

$$Y_1 = Y_{1(0)} \left[\beta_1 e^{-\lambda_1 X} + \beta_2 e^{-\lambda_2 X} + \beta_3 e^{-\lambda_3 X} \right]$$

$$Y_2 = \frac{Y_{2(0)}}{M_2} \left[\gamma_1 e^{-\lambda_1 X} + \gamma_2 e^{-\lambda_2 X} + \gamma_3 e^{-\lambda_3 X} \right]$$

El detalle para la solución algebraica que permite obtener los valores de las tasas de intercambio se ilustra en el apéndice.

3.4.2. Modelo N° 2

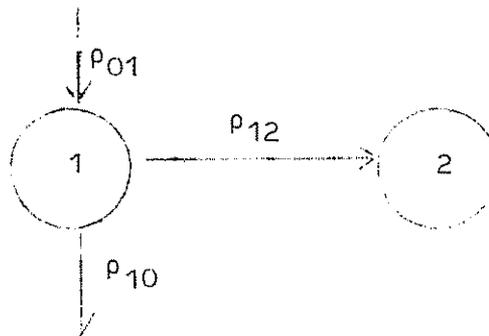


Fig. 2. Modelo propuesto para estimar consumo, digestibilidad aparente y producción fecal.

1 = Compartimiento digestivo

2 = Compartimiento vascular

ρ_{01} = Tasa de consumo

ρ_{12} = Tasa de asimilación

ρ_{10} = Tasa de producción fecal

El modelo de la Figura 2 se puede expresar matemáticamente con la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dY_1}{dX} = - \frac{\rho_{10}}{M_1} + \frac{\rho_{12} Y_1^2}{M_1} \quad [1]$$

llamando:

$$- \frac{\rho_{10}}{M_1} = a \quad [2]$$

$$\frac{\rho_{12}}{M_1} = b \quad [3]$$

se obtiene:

$$\frac{dY_1}{dX} = a Y_1 + b Y_1^2 \quad [4]$$

integrando se obtiene:

$$Y_1 = \frac{a}{c e^{-aX} - b} \quad [5]$$

Ecuación exponencial que describe las curvas de concentración fecal del indicador cuando la dosis es única a partir del punto de máxima concentración. X es el tiempo en horas y Y el valor de concentración del indicador.

De la ecuación [5] se tiene:

$$c = \frac{a}{H_{1(0)}} + b \quad [6]$$

Además:

$$M_1 = \frac{\text{dosis}}{Y_1(o)} \quad [7]$$

Reemplazando estos valores en [2] y [3] se tiene:

$$\rho_{10} = \text{dosis} (b - c) \quad [8]$$

$$\rho_{12} = \text{dosis} \frac{b (c - b)}{a} \quad [9]$$

El consumo será

$$\rho_{01} = \rho_{10} + \rho_{12} \quad [10]$$

3.4.3. Modelo N° 3

El modelo 3 es semejante al modelo 2, pero referido a dosis múltiple. Se puede expresar matemáticamente con la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dy_1}{dx} = \frac{\beta_{01}}{M_1} - \frac{\rho_{10}}{M_1} Y_1 + \frac{\rho_{12}}{M_1} Y_1^2 \quad [1]$$

Definiendo:

$$a = \frac{\beta_{01}}{M_1} \quad [2]$$

$$b = \frac{-\rho_{10}}{M_1} \quad [3]$$

$$c = \frac{\rho_{12}}{M_1} \quad [4]$$

en que β_{01} es la dosis múltiple del indicador.

Reemplazando valores se obtiene:

$$\frac{dY_1}{dX} = a + b Y_1 + c Y_1^2 \quad [5]$$

Integrando esta ecuación se tiene:

$$Y = \frac{1 - e^{\beta X}}{K_0 e^{\beta X} + K_1} \quad [6]$$

en que:

$$\beta = \sqrt{b^2 - 4 a c} \quad [7]$$

$$K_0 = \frac{b - \beta}{2a} \quad [8]$$

$$K_1 = \frac{-(b - \beta)}{2a} \quad [9]$$

La ecuación [6] describe teóricamente las curvas de concentración del indicador en heces para dosis múltiple.

Los parámetros se pueden obtener del siguiente modo:

$$\rho_{12} = c M_1 \quad [10]$$

$$\rho_{10} = -(b M_1) \quad [11]$$

El consumo será:

$$\rho_{01} = \rho_{10} + \rho_{12} \quad [12]$$

3.4.4. Otros modelos

Además de los modelos descritos, se usaron también otras funciones no lineales que se indican a continuación:

Modelo 4

El valor asintótico C_o en la ecuación empírica:

$$Y = C_o + C_1 e^{-bX} \quad [1]$$

es la concentración del indicador a tiempo infinito. La dosis diaria de indicador ρ_{10} , será:

$$\rho_{10} = C_o \text{ MSf} \quad [2]$$

Por consiguiente:

$$\text{MSf/día} = \frac{\text{dosis/día}}{C_o} \quad [3]$$

Modelo N° 5

$$Y = C_o (1 + e^{-bX})$$

en que C_o se refiere como en el modelo 4, y MSf se calcula en igual forma.

Modelo N° 6

$$Y = Y_{(0)} e^{-bX} \quad [1]$$

en que:

$$b = \frac{\rho_{10}}{M_1} \quad [2]$$

$Y_{(0)}$ = Concentración del indicador a tiempo (0) (Fig. 3).

La dosis única del indicador será:

$$\text{dosis} = Y_{(0)} M_1 \quad [3]$$

Por consiguiente resolviendo [2] para ρ_{10} , y despejando [3] y reemplazando el valor M_1 en [2] se tiene:

$$P_{10} = \frac{b \text{ (dosis)}}{Y(o)}$$

[4]

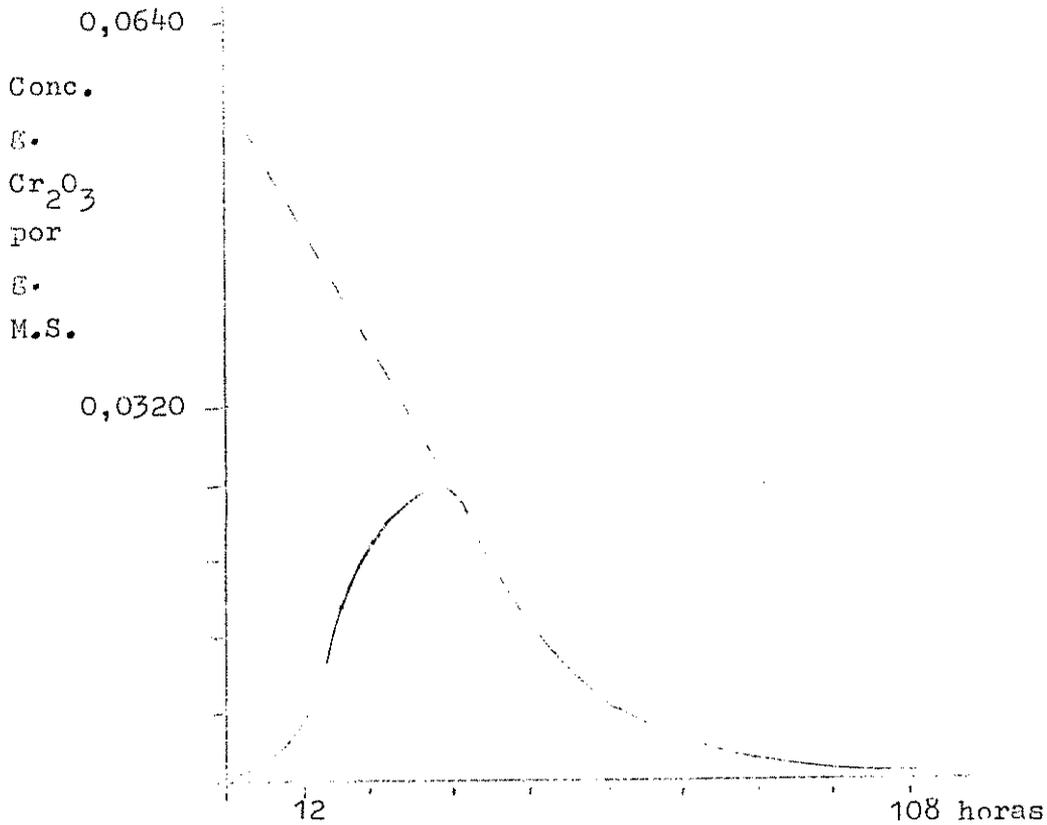


Fig. 3. Curva de concentración de indicador en heces con dosis única.

3.5. Análisis de laboratorio

Siguiendo normas de la A.O.A.C. (4) se determina materia seca al aire (MSa) y materia seca al vacío (MSv) para todas las muestras individuales de pasto ofrecido, pasto rechazado, ingestas y heces fecales. El óxido crómico se analizó mediante el método de Czarnocky et al. (9) para muestras individuales de ingestas y heces fecales.

Las muestras se analizaron por duplicado, repitiendo las que dieron diferencias mayores al 5 por ciento entre duplicados.

3.6. Análisis estadístico

Para el ajuste de los datos de concentración de acuerdo a las ecuaciones de los modelos 2 y 3, se usó un método interactivo (31). El método original fue modificado localmente* para proporcionar estimaciones de r^2 y facilitar la convergencia.

Los datos estimados de consumo y producción fecal, fueron comparados con los verdaderos valores observados mediante la ecuación $Y = a + bX$, en que:

- X = valores estimados
- Y = valores verdaderos medidos
- b = coeficiente de regresión
- a = constante de regresión.

Las hipótesis nulas fueron las siguientes:

- Y = X
- a = 0
- b = 1

* Oscar Rojas, programador de I.B.M. San José, Costa Rica.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Curvas de concentración del indicador

Las pruebas exploratorias realizadas para conocer el comportamiento del indicador en el rumen, administrado en dosis única, dieron las curvas de la Figura 4 para los niveles de profundidad: superficial (A), medio (B) y profundo (C).

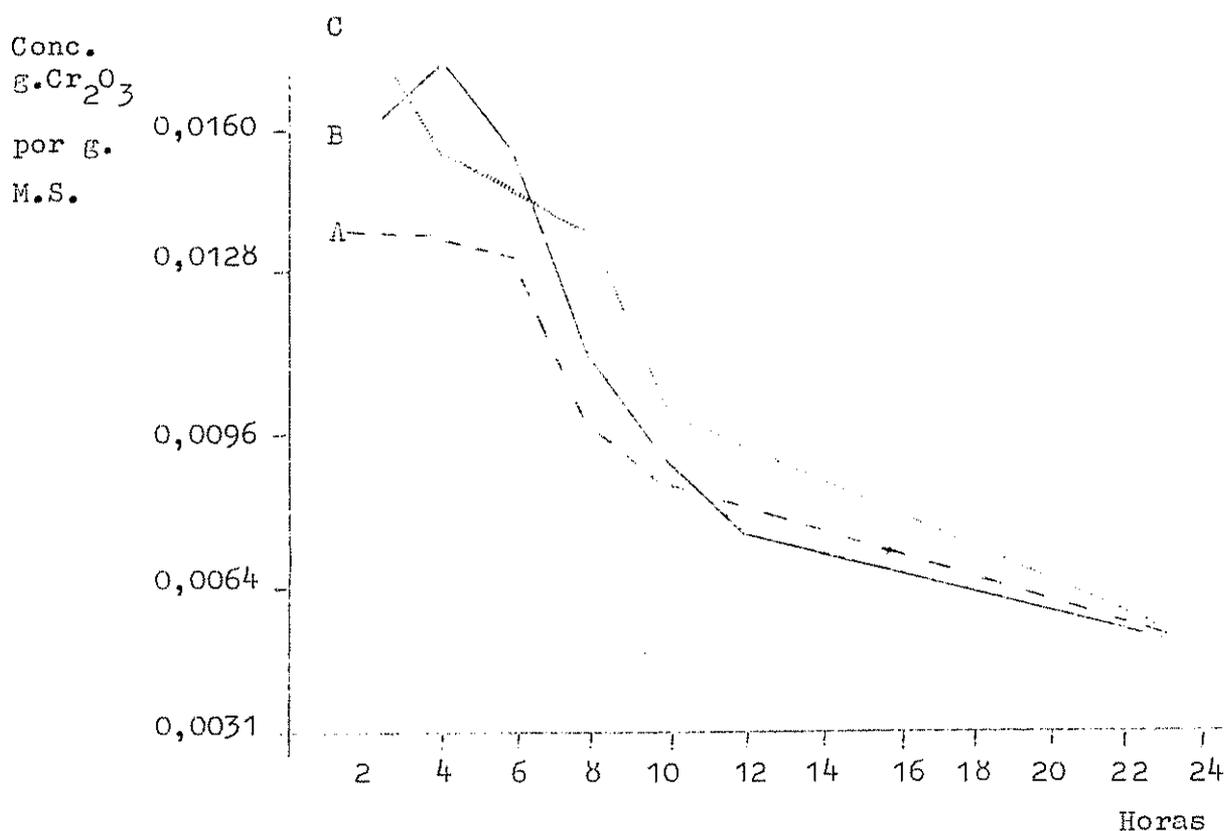


Fig. 4. Curvas de concentración de indicador de dosis única en 3 niveles de contenido ruminal.

La variación de las curvas obtenidas para los 3 niveles fueron también encontradas por otros autores (18), corroborando el concepto

de que la mezcla de alimentos en el compartimiento ruminal no es uniforme durante las 6 primeras horas después de dosificación. Por la variación encontrada, se resolvió analizar la concentración en una muestra compuesta de los 3 niveles, dando la curva de la Figura 5, con más uniformidad y con una orientación definida hacia ecuaciones de tipo exponencial (18, 27).

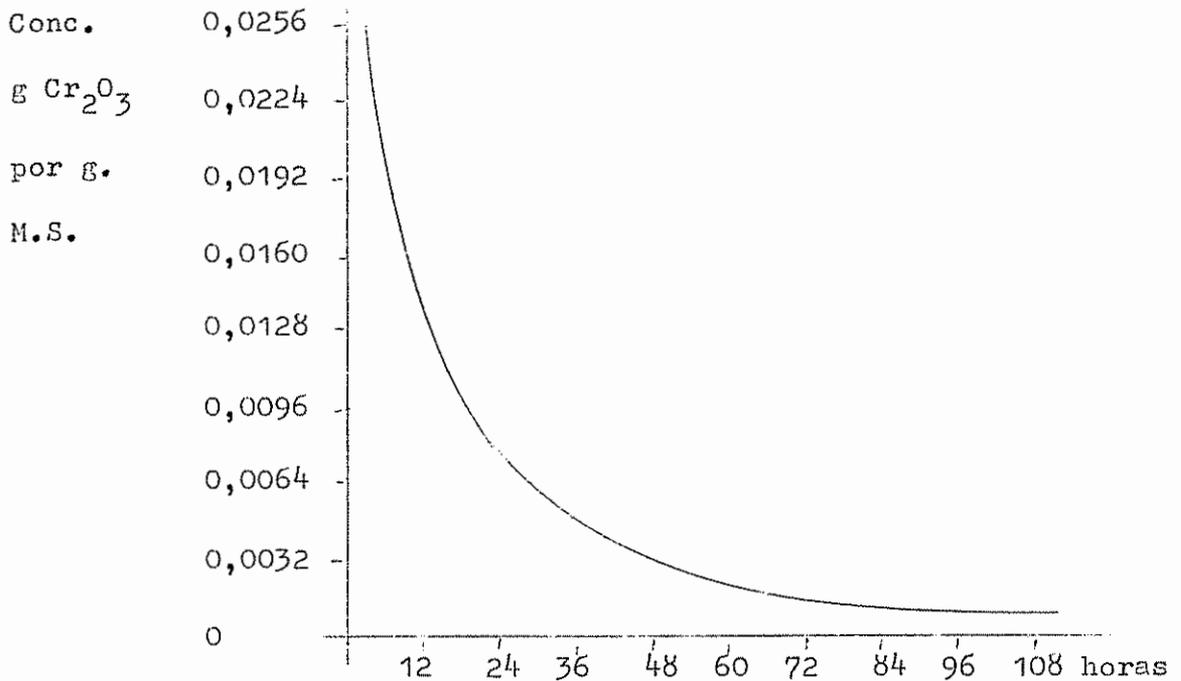


Fig. 5. Curva de concentración de indicador en ingestas para muestra compuesta. Dosis única.

En el caso de dosis múltiples de indicador (2 veces por día), la concentración en el rumen dio curvas como en la Figura 6, cuya interpretación teórica es difícil.

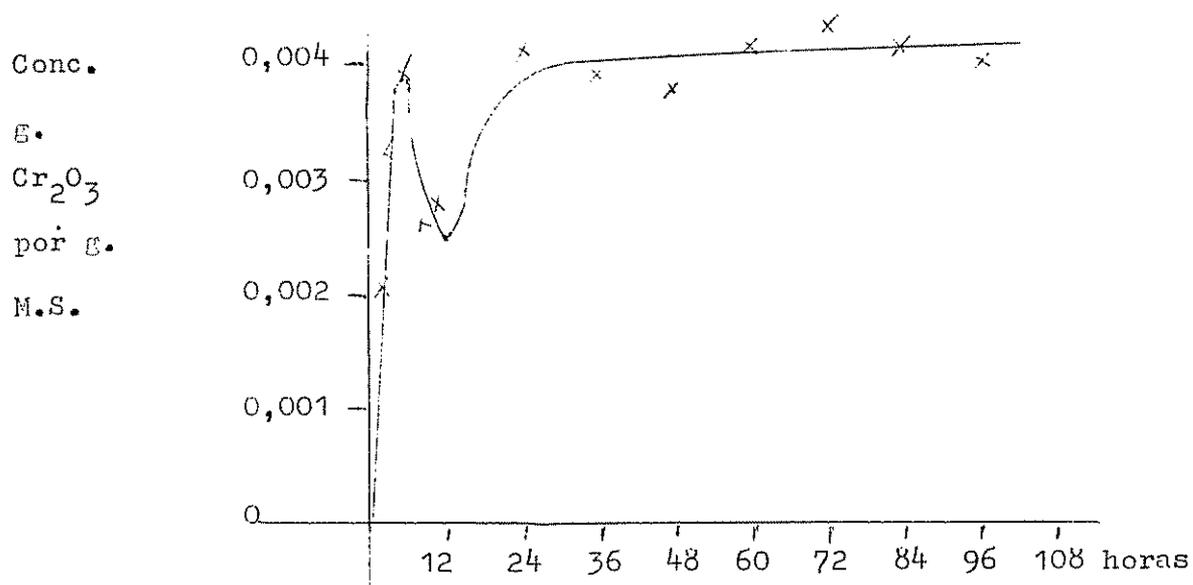


Fig. 6. Curva de concentración de indicador en el rumen para muestra compuesta. Dosis múltiple (2 por día).

Las curvas de excreción en heces tanto para dosis única como para dosis múltiple administrada cada 12 horas, dieron curvas (Fig. 7 y Fig. 8) semejantes a los encontrados por otros autores (7, 10, 15, 18, 22).

Sin embargo, cuando se dosificó cada 24 horas, se obtuvo una curva (Fig. 9) cuyos picos escalonados mostraron mayor variabilidad. Este resultado se encuentra acorde con los informes de Davis et al. (10) quienes encontraron menos variación con la administración del Cr₂O₃ 2 veces por día que con una sola dosis. Resultados semejantes fueron obtenidos en otros trabajos (13, 28).

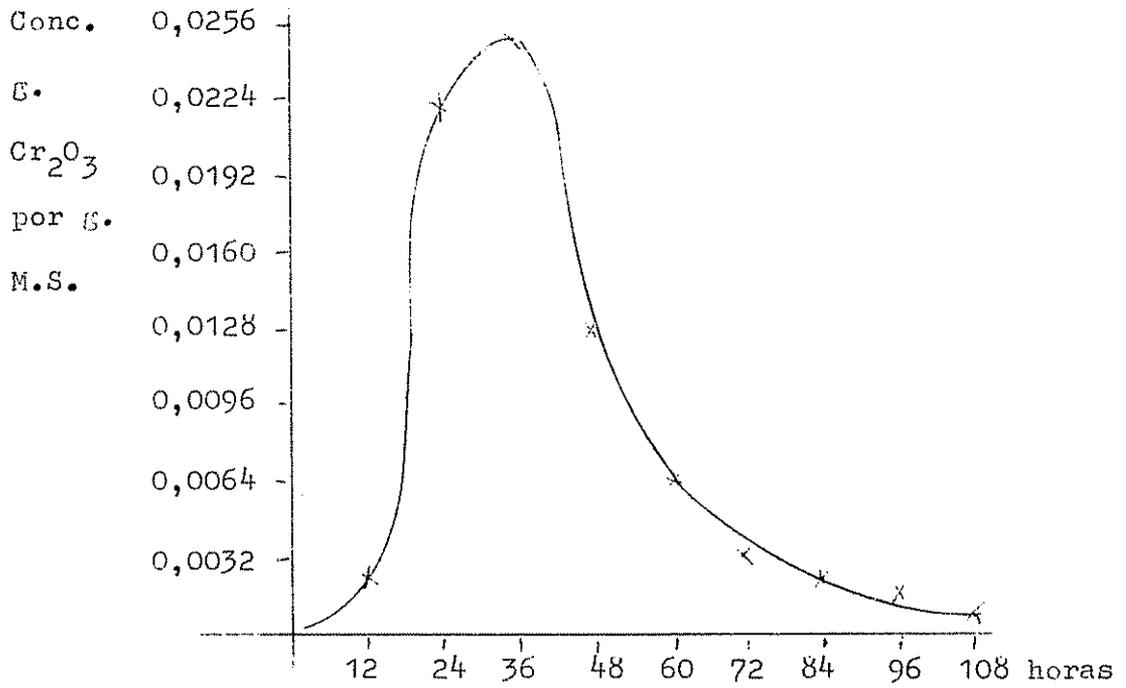


Fig. 7. Curva de excreción en heces fecales. Dosis única.

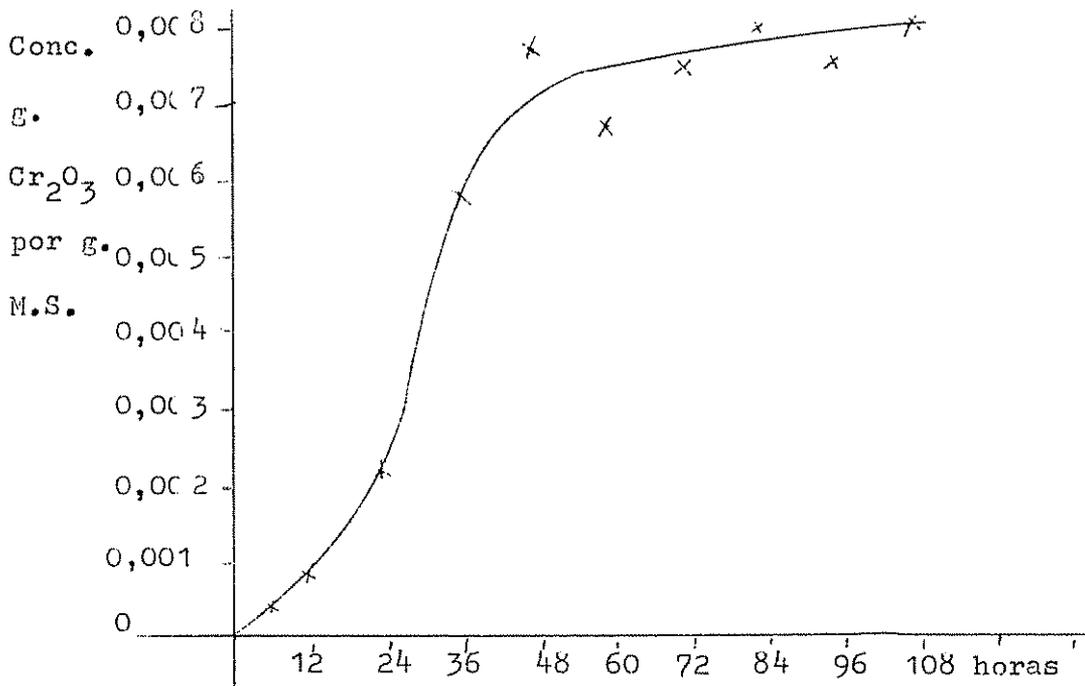


Fig. 8. Curva de excreción en heces fecales. Dosis múltiple.

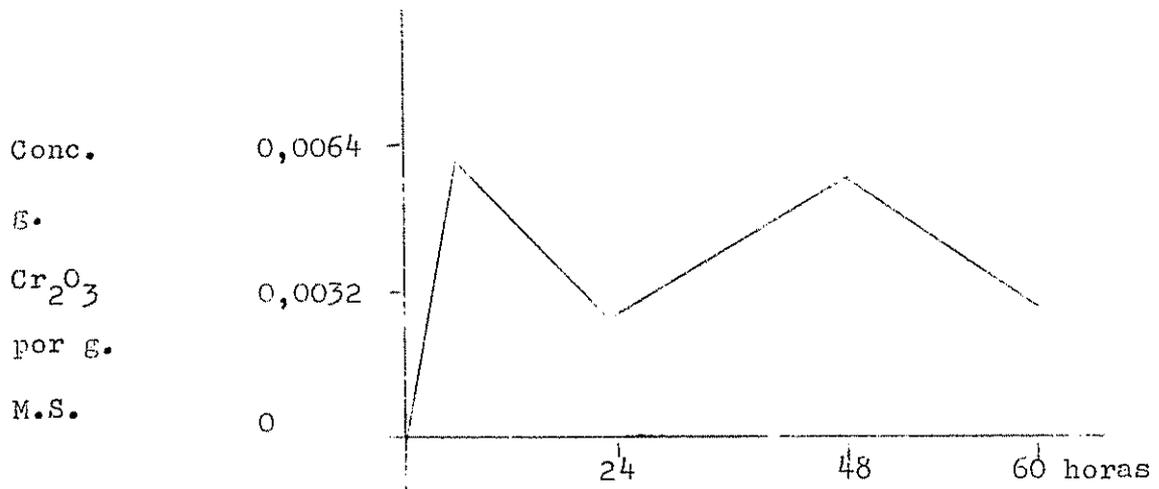


Fig. 9. Curva de concentración de indicador en ingestas para dosis múltiple 1 vez por día.

La precisión de las curvas de concentración de indicador en ingestas y heces fecales se indican en el Cuadro 1.

En el Cuadro 1 no figura la evaluación de las curvas del modelo 1 porque según puede verse en las Figuras 4 y 6 se presentaron problemas debidos al proceso de mezcla del indicador y la ingesta. Por tal razón no fue posible utilizar el modelo 1. Todos los modelos ajustaron con buena precisión según se puede ver en el Cuadro 1.

El modelo 2 aplicado en datos de ingestas ($r^2 = 0,95^*$) dio valores negativos para el parámetro b en que $Y = a/ce^{-ax} - b$. Por definición $b = \rho_{12}/M_1$ en que ρ_{12} = tasa de asimilación y M_1 = contenido del compartimiento ruminal; no puede ser negativo. Este resultado, que no es lógico, significa que la concepción teórica del modelo no está acorde a lo que sucede en el tracto digestivo de

Cuadro 1. Precisión en la estimación de la concentración del indicador en función del tiempo en ingestas y heces fecales.

M o d e l o	Valores promedio de r^2
M 2, heces, dosis única, papel	0,94
M 2, heces, dosis única, harina	0,92
M 2, heces, dosis única, papel cromado	0,99
M 2, ingestas, dosis múltiple, papel cromado	0,95 *
M 3, heces, dosis múltiple	0,94 *
M 4, heces, dosis múltiple, papel	0,96 (a)
M 4, heces, dosis múltiple, harina	0,96 (a)
M 5, heces, dosis múltiple, papel cromado	0,90
M 6, heces, dosis única, papel cromado	0,98

* Modelos deshechados por dar parámetros no esperados.

(a) Obtenidos por Pérez (22).

los rumiantes. Lo mismo aconteció con el modelo 3 aplicado a los datos de heces fecales.

Observando el comportamiento del indicador según el método empleado en su dosificación, se ve claramente que el indicador pasa más rápidamente por el tracto digestivo cuando se encuentra mezclado con harina que impregnado en papel Kraft (Fig. 10).

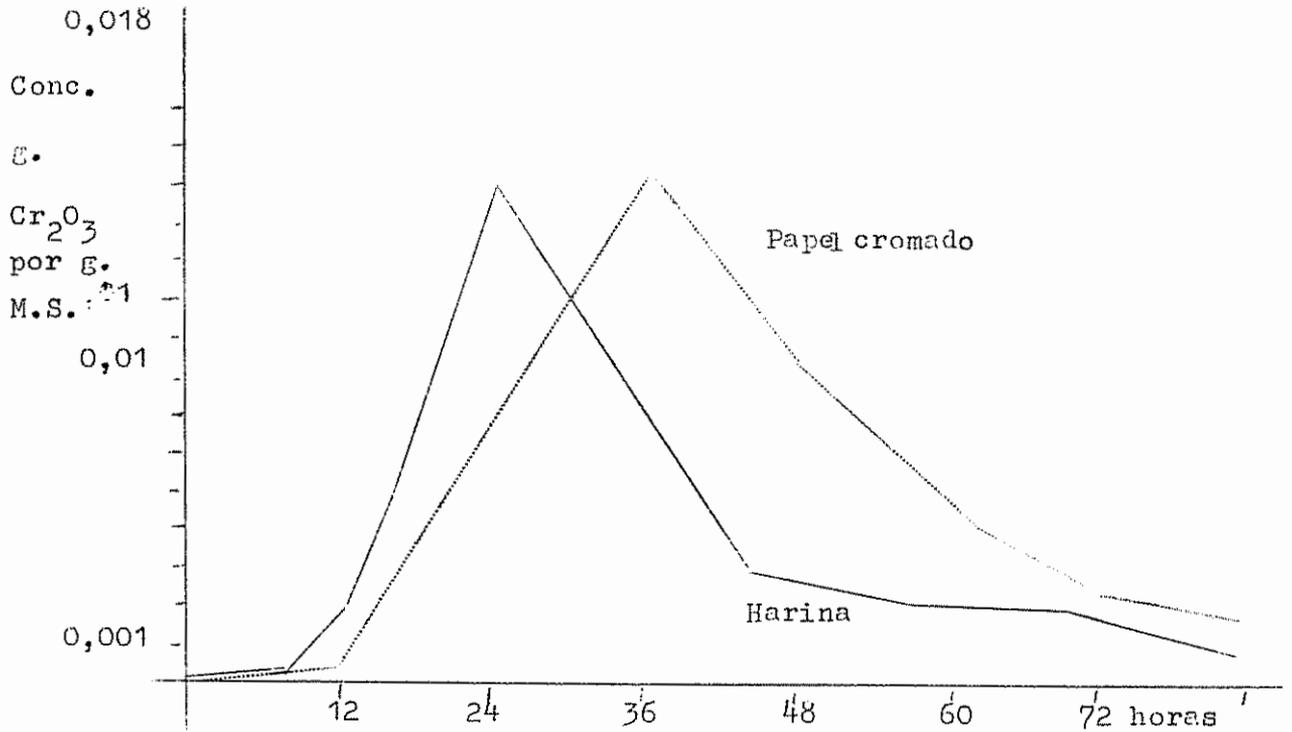


Fig. 10. Comportamiento de indicador y velocidad de excreción de acuerdo al vehículo de administración.

Es un hecho ya conocido que el polvo fino de Cr_2O_3 pasa más rápidamente por el tracto digestivo (5, 15) que el papel cromado. Este efecto influye en la concentración del indicador en las muestras de heces y puede afectar los resultados.

4.2. Predicción del consumo de forraje

De todos los modelos planteados, sólo fue posible obtener estimación de consumo de forraje con el modelo 2, a partir del estudio de excreción del indicador administrado como dosis única.

Los resultados de consumo se resumen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Consumo medido y estimado según modelo 2. Kg por día.

M é t o d o	Consumo de Materia Seca		
	Medido	Estimado	Ajustado (a)
Papel	4,74	6,26	4,36
Harina	4,49	8,51**	4,07
Papel cromado	5,54	83,15**	5,54

** Diferencia significativa ($P < 0,01$)

(a) estimado y corregido con las ecuaciones [A], [B] y [C] del Cuadro 3.

La comparación entre los valores medidos y estimados usando el análisis de regresión dio los parámetros de evaluación que se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Evaluación de la predicción del consumo de materia seca usando el modelo 2.

Métodos	Parámetros de regresión		r^2	C.V.	Ecuación
	a	b			
Papel	3,18*	0,25**	0,31	43,2	[A]
Harina	3,53**	0,11**	0,17	33,2	[B]
Papel cromado	5,38**	0,0019**	0,08	18,4	[C]

** diferencia significativa ($P < 0,01$)

* diferencia significativa ($P < 0,05$)

Como puede verse en el Cuadro 2, el consumo estimado sobreestima el consumo verdadero ($P < 0,01$). Cuando estos valores estimados fueron corregidos mediante las ecuaciones [A], [B] y [C] del Cuadro 3, la sobreestimación desapareció. Sin embargo, como se puede observar por los valores de r^2 del Cuadro 3, la predictibilidad de dichas ecuaciones es sumamente baja. Del mismo cuadro se puede deducir que los parámetros a y b para $Y = a + bX$, obtenidos experimentalmente, son diferentes significativamente ($P < 0,01$) de la hipótesis $a = 0$ y $b = 1$. Se deduce que ninguno de los modelos planteados estima consumo con precisión aceptable. En consecuencia los resultados anotados implican que la teoría planteada no explica convenientemente la cinética del indicador en el tracto digestivo.

4.3. Predicción de la producción de materia seca fecal

La predicción de la materia seca fecal (MSf) en base a datos de concentración de indicador en heces, se resume en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Producción fecal medida y estimada. Kg por día.

Modelo y método	Producción de materia seca fecal		
	Observada	Estimada	Ajustada(a)
M 2, papel, dosis única	1,95	3,81**	1,95
M 2, harina, dosis única	1,81	5,32**	1,81
M 2, papel cromado, dosis única	1,59	1,70	1,59
M 4, papel, dosis múltiple	1,83	1,84	1,83
M 4, harina, dosis múltiple	1,78	2,43**	1,82
M 5, papel cromado, dosis única	1,81	1,24*	1,81
M 6, papel cromado, dosis múltiple	1,84	1,59	1,84

** dif. significativa ($P < 0,01$) * dif. significativa ($P < 0,05$)

(a) ajustadas por ecuaciones del Cuadro 5.

La comparación entre los valores medidos y estimados usando el análisis de regresión dio los parámetros de evaluación que se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Evaluación de la predicción de producción fecal.

Modelos y métodos	Parámetros de regresión		r^2	C.V.	Ecuación
	a	b			
M 2, papel, dosis única	0,869*	0,283*	0,50	33,3	[D]
M 2, harina, dosis única	1,543**	0,050*	0,04	35,6	[E]
M 2, papel cromado, dosis única	1,401**	0,113*	0,15	29,1	[F]
M 4, papel, dosis múltiple	0,548	0,966	0,64	20,3	[G]
M 4, harina, dosis múltiple	0,634	0,489	0,59	20,4	[H]
M 5, papel cromado, dosis única	0,862*	0,764	0,64	27,2	[I]
M 6, papel cromado, dosis múltiple	1,101*	0,472	0,65	19,2	[J]

** dif. significativa ($P < 0,01$)

* dif. significativa ($P < 0,05$)

Según se puede ver en el Cuadro 4, el modelo 2 sobreestima los valores verdaderos de MSf ($P < 0,01$). Corrigiendo los valores estimados mediante las ecuaciones de regresión [D], [E] y [F], desaparece la sobreestimación, aunque la predictibilidad de dichas ecuaciones es muy baja, especialmente con el uso de indicador con harina ($r^2 = 0,04$), como puede verse en el Cuadro 5. Asimismo los parámetros a

y b para $Y = a + bX$ no están acordes con la hipótesis planteada ($P < 0,01$) en que $a = 0$ y $b = 1$.

De acuerdo con lo mostrado en el Cuadro 4, también se encontraron diferencias significativas ($P < 0,01$) para el uso de indicador con harina en el modelo 4. Sin embargo cuando se hizo el ajuste mediante la ecuación [H] desapareció la diferencia. La predictibilidad r^2 de la ecuación [H] fue mejor que en el caso del modelo 2.

Observando los cuadros 4 y 5, una mejor precisión se obtuvo cuando se usó el modelo 4 mediante el indicador con papel. Resultados semejantes a los obtenidos con el modelo 4, se observaron con los modelos 5 y 6. Esto se encuentra acorde con lo encontrado por Pérez (22) al utilizar dichos modelos con indicador en papel y harina.

4.4. Predicción de la asimilación

Los resultados obtenidos para consumo usando el modelo 2, tienen como paso intermedio la estimación de la asimilación usando la siguiente relación: Consumo = asimilación + producción fecal. Los resultados correspondientes a los valores de asimilación se resumen en el Cuadro 6.

La comparación entre los valores medidos y estimados usando el análisis de regresión dio los parámetros de evaluación que se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 6. Asimilación medida y estimada con el modelo 2. Kg por día.

Métodos	Asimilación de la materia seca		
	Observada	Estimada	Ajustada (a)
Papel	2,79	2,45	2,79
Harina	2,62	3,68	2,62
Papel cromado	3,53	81,45**	3,53

** Diferencia significativa ($P < 0,01$)

(a) Corregida por ecuaciones [K], [L], [M] del Cuadro 7.

Cuadro 7. Evaluación de la predicción de asimilación de materia seca usando el modelo 2.

Métodos	Parámetros de regresión		r^2	C.V.	Ecuación
	a	b			
Papel	2,39	0,162	0,05	51,9	[K]
Harina	2,05	0,155*	0,13	44,9	[L]
Papel cromado	3,47	0,0007**	0,05	6,62	[M]

* Diferencia significativa ($P < 0,05$)

** Diferencia significativa ($P < 0,01$)

Como puede verse en el Cuadro 6, la asimilación estimada usando papel cromado, sobreestima grandemente los valores verdaderos observados ($P < 0,01$). Esta sobreestimación desaparece cuando se corrige mediante la ecuación [M] del Cuadro 7. Observando los valores de r^2 del Cuadro 7, se deduce que la precisión de las estimaciones de asimilación es muy baja para los tres métodos. Del Cuadro 7 también se puede observar que los parámetros de regresión obtenidos son significativamente diferentes ($P < 0,05$) de la hipótesis planteada $a=0$ y $b=1$. Por consiguiente, el método propuesto no estima la asimilación con precisión aceptable.

4.5. Consideraciones sobre la cinética del indicador

La baja predictibilidad de los valores obtenidos en consumo y producción fecal al utilizar el modelo 2, y la obtención de parámetros con signos diferentes a los esperados en el ajuste de las curvas de excreción con dicho modelo, demuestra con bastante certeza que el indicador sólo marca la parte indigerible del alimento. Por otro lado, la mezcla no uniforme de indicador con alimento, confirma la observación hecha por Pérez (22) de la existencia de un pseudo-compartimiento de mezcla dentro del rumen. Por consiguiente la inclusión de dicho compartimiento en las consideraciones teóricas podría aumentar la precisión de las estimaciones. Sería pues aconsejable modelar una nueva función que comprenda al pseudo-compartimiento de mezcla. Además también sería aconsejable aumentar la dosis del indicador y prolongar el número de días de observación. El muestreo de heces fecales podría hacerse sólo desde las 24 horas siguientes a la dosificación.

5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el presente trabajo se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- 1) En las primeras 6 horas después de la dosificación, no hay mezcla uniforme de indicador con el alimento del rumen, lo cual impide usar la información obtenida durante este tiempo.
- 2) En vista de que el óxido crómico marca únicamente el material no asimilable, no es posible predecir directamente con precisión aceptable consumo ni asimilación mediante el uso de este indicador.
- 3) El método compartamental propuesto no estima con precisión aceptable el consumo ni la asimilación, pero es posible predecir la producción fecal usando las curvas de excreción del óxido crómico.
- 4) En vista de que el método de dosis única presenta igual precisión que el de dosis múltiple, se puede sustituir con ventaja el método de dosificación múltiple tradicional por el método de dosis única para estimar producción fecal, ya que permite ahorrar tiempo en la realización de las pruebas de consumo y de digestibilidad así como de realizar pruebas con una secuencia no mayor a 7 días.

6. RESUMEN

El presente estudio se realizó en el departamento de Ganadería Tropical del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Su objetivo principal fue poner a prueba experimental un método para determinar consumo y digestibilidad de pasto por bovinos en pastoreo usando óxido crómico como indicador. El método propuesto se basa en el análisis matemático compartamental del sistema digestivo y supone que indicador y alimento tienen la misma cinética de excreción. Se fundamenta en el uso de las curvas de concentración de Cr_2O_3 en ingestas y heces.

Se utilizaron datos disponibles de muestras de heces fecales de 80 animales que recibieron indicador en dosis única y múltiple mezclados con harina y papel molido y datos de 12 animales fistulados que recibieron dosis única y múltiple del indicador impregnado en papel Kraft. Para determinar la concentración del indicador en función del tiempo, se tomaron muestras de ingestas cada 12 horas.

Los análisis de Cr_2O_3 para 3 niveles de profundidad del rumen, mostraron diferencias marcadas de concentración en las primeras horas seguidas a la dosificación, mostrando que no hay mezcla uniforme de indicador y alimento en las primeras 6 horas. Las concentraciones de ingestas para dosis múltiple dieron curvas de difícil interpretación imposibilitando su utilización. También se observó que el indicador mezclado con harina, pasa más rápidamente por el tracto digestivo que impregnado en papel Kraft. La precisión de la predicción del consumo de alimentos fue muy baja ($r^2 = 0,08$ a $0,31$),

mientras que la producción fecal se estimó con mayor precisión ($r^2 = 0,59$ a $0,65$).

Por la evidencia experimental se concluye que no es posible predecir consumo de alimentos mediante el método propuesto, pues, aparentemente el indicador marca únicamente la porción indigerible. Sin embargo es posible predecir la producción fecal en menos días que con el método tradicional, con precisión semejante y usando una sola dosis de indicador. Además, la eliminación del indicador a corto plazo permite hacer determinaciones de digestibilidad sucesivas con el mismo animal con una secuencia no mayor a una semana. Para aumentar la precisión de las estimaciones se recomienda realizar ajustes en el modelo matemático considerando los problemas de mezcla del indicador en el rumen.

7. SUMMARY

The present study was performed at the Tropical Research and Training Center at the Inter-American Institute of Agricultural Science in Costa Rica. Its objective was mainly to test a method of estimating intake and digestibility of herbage by grazing bovines using chromic oxide as an indicator. The proposed method is based in the mathematical analysis of the compartments of the digestive tract and assumes that indicator and feed are excreted simultaneously. The model involves using curves of chromic oxide excretion in the ingesta and the feces.

Data were used from 80 animals which received chromic oxide in single or multiple doses in combination with either flour or ground paper as carriers. Data were also used from twelve fistulated animals which received chromic oxide impregnated in "Kraft" paper. Samples of ingesta were taken at intervals of two hours during the first 12 hours after dosification and at 12 hours intervals up to 108 hours for 5-day periods.

The chromic oxide analysis at three ruminal levels gave different curves through the first six hours, which indicates that feed and indicator are not mixed uniformly during the first six hours. The curves from ingestas representing single dose indicators produced inconclusive results. The indicator mixed in flour passed the digestive tract faster than chromic oxide paper. The accuracy of predicting consumption was very low ($r^2 = 0,08$ to $0,031$) as was the accuracy for digestibility ($r^2 = 0,048$ to $0,129$), whereas for fecal

production the precision was higher ($r^2 = 0,50$ to $0,65$).

According to results obtained, one may conclude that it is not possible to predict feed consumption nor digestibility by the proposed method. The principal problem is apparently due to the tendency for chromic oxide to pass the digestive tract in closed association with the indigestible portions of the ingesta. However, it is possible to predict with the same accuracy, fecal production in fewer days than with the conventional method by using a single dose indicator. Furthermore, the excretion of indicator in a short period would permit determination of digestibility with the same animal in successive one-week trials. To increase the accuracy of the proposed method, mathematical models involving mixing problems is recommended.

8. LITERATURA CITADA

1. ALBA, J. de. Alimentación del ganado en América Latina. 2da. edición. México, La Prensa Mexicana, 1971. 475 p.
2. ALEXANDER, R. H. Establecimiento de un sistema de digestibilidad in vitro en el laboratorio. In Paladines, O. ed. Métodos in vitro para determinar el valor nutritivo de los forrajes. Montevideo, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Zona Sur. 1967. pp. 101-145.
3. ARNOLD, G. W. Empleo de técnicas in vitro en asociación con técnicas de muestreo para medir la digestibilidad y el consumo de forrajes bajo pastoreo. In Paladines, O. ed. Métodos in vitro para determinar el valor nutritivo de los forrajes. Montevideo, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Zona Sur. 1967. pp. 61-97.
4. ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS. Official methods of analysis. 9th ed. Washington, D. C., 1960. 832 p.
5. BALCH, C. C. y CAMPLING, R. C. Rate of passage of digesta through the ruminant digestive tract. In Dougherty, R. W. et al. ed. Physiology of digestion in the ruminant. Washington, Butterworth, 1965. pp. 108-123.
6. COLBURN, M. W., EVANS, J. L. y RAMAGE, C. H. Apparent and true digestibility of forage nutrients by ruminant animals. Journal of Dairy Science 51(9):1450-1457. 1968.
7. CORBETT, J. L., GREENHALGH, J. F. D., McDONALD, I. y FLORENCE, E. Excretion of chromium sesquioxide as a component of paper to sheep. British Journal of Nutrition 14:289-299. 1960.
8. _____, GREENHALGH, J. F. D., GWYNN, P. E. y WALKER, D. Excretion of chromium sesquioxide and polyethylene glycol by dairy cows. British Journal of Nutrition 12(3):266-276. 1958.
9. CZARNOCKI, J., SIBBALD, I. R. y EVANS, E. V. The determination of chromic oxide in samples of feed and excreta by acid digestion and spectrophotometry. Canadian Journal of Animal Science 41(2):167-179. 1961.
10. DAVIS, C. L., BYERS, J. H. y LUBER, L. E. An evaluation of the chromic oxide method for the determining digestibility. Journal of Dairy Science 41:152-159. 1958.

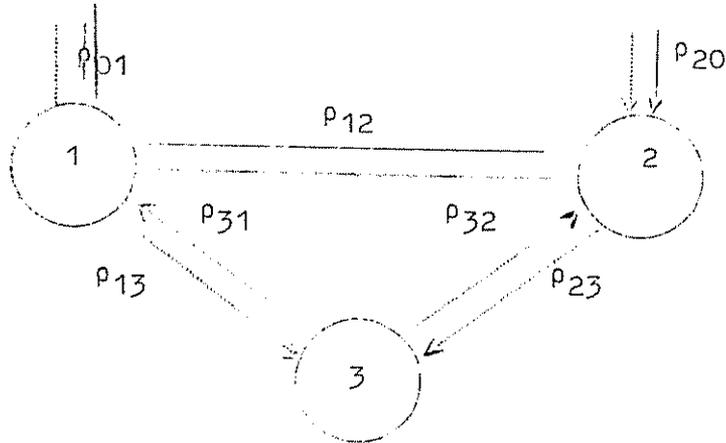
11. GARDNER, A. L. Estudio sobre los métodos agronómicos para la evaluación de las pasturas. Montevideo, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Zona Sur, 1967. 80 p.
12. GREENHALGH, J. F. y CORBETT, J. L. The indirect estimation of the digestibility of pasture herbage. I. Nitrogen and chromogen as faecal index substances. *Journal of Agriculture Science* 55:371-376. 1960.
13. HATTAN, G. L. y OWEN, F. G. Efficiency of total collection and chromic oxide techniques in short-term digestion trials. *Journal of Dairy Science* 53(3):325-329. 1970.
14. ITURBIDE, A. El óxido crómico como indicador externo para estimar producción fecal y consumo en las pruebas de digestibilidad. *Turrialba* 17(3):304-313. 1967.
15. JOHNSON, D. E., DINUSSON, W. E. y DOLIN, D. W. Rate of passage of chromic oxide and composition of digesta along the alimentary tract of wethers. *Journal of Animal Science* 23:499-505. 1964.
16. JUKO, C. D., BREDON, R. M. y MARSCHAL, B. The nutrition of the Zebu cattle. II. The techniques of digestibility trials with special reference to sampling, preservation and drying of feces. *Journal of Agriculture Science* 56(1):93-98. 1961.
17. KIESLING, H. E., BARRY, H. A., NELSON, A. B. y HERBEL, C. H. Recovery of chromic oxide administered in paper to grazing steers. *Journal of Animal Science* 29(2):361-364. 1969.
18. KING, K. W. y MOORE, W. E. C. Density and size as factors affecting passage rate of ingesta in the bovine and human digestive tracts. *Journal of Dairy Science* 40:528-536. 1957.
19. KLEIBER, M. *The Fire of Life; an introduction to animal energetics.* New York, John Wiley, 1961. 454 p.
20. LANGLANDS, J. P., CORBETT, J. L. y McDONALD, I. The indirect estimation of the digestibility of pasture herbage. III. Regressions of digestibility on faecal nitrogen concentration: effects as species and individuality of animal and of the method of determining digestibility upon the relationships. *Journal of Agriculture Science* 61:221-226. 1963.
21. MITCHELL, H. H. *Comparative nutrition of man and domestic animals.* New York, Academic Press, 1964. 840 p. Vol. II.

22. PEREZ, A. S. Evaluación de métodos para estimar producción fecal en bovinos, usando óxido crómico. Tesis Mag. Agr. Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1971. 67 p. (mimeografiado).
23. PFANDER, W. H. Forage intake and digestibility research--Now and When?. In Barnes, R. F., Clanton, D. C., Gordon, C. H., Knopfenstein, T. J. y Waldo, D. R. Proceedings of the National Conference on Forage Quality and Utilization. Nebraska center for Continuing Education. Lincoln, Nebraska, 1970. pp. H1-H21.
24. RAYMOND, W. F. The nutritive value of herbage. In Abrams, J. T. ed. Recent advances in Animal Nutrition. London, J. and A. Churchill Ltd., 1966. pp. 81-118.
25. REID, J. T. El valor relativo de los resultados agronómicos y con animales en investigaciones sobre pasturas. In Paladines, O. ed. Empleo de animales en las investigaciones sobre pasturas. Montevideo, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Zona Sur. 1966. pp. 31-60.
26. SCHENEIDER, B. H., LUCAS, H. L., PAVLECH, H. M. y CIPOLLINI, M. A. Estimation of the digestibility of feeds from their proximate composition. Journal of Animal Science 10: 707-713. 1951.
27. SCHURCH, A. F., LLOYD, L. E. y CRAMPTON, E. W. The use of chromic oxide as an index for determining the digestibility of a diet. Journal of Nutrition 41:629-636. 1950.
28. SMITH, A. H. y REID, J. T. Use of chromic oxide as an indicator of fecal output for the purpose of determining the intake of pasture herbage by grazing cows. Journal of Dairy Science 38(5):515-524. 1955.
29. STREETER, C. L. A review of techniques used to estimate the in vivo digestibility of grazed forage. Journal of Animal Science 29(5):757-768. 1969.
30. VAN SOEST, P. J. Development of a comprehensive system of feed analysis and its application to forages. Journal of Animal Science 26:119-128. 1967.
31. VOGEL, R. Single precision non-linear squares curve fitting program for 7040 (Based on non-linear least squares algorithm). Louisiana State University, Computer Research Center. s.f. (mimeografiado).
32. WILKINSON, J. M. y PRESCOTT, J. H. D. The use of chromic oxide in the measurement of individual feed intake in cattle fed on silage and barley. Animal Production 12:71-80. 1970.

A P E N D I C E

1. Desarrollo teórico del modelo N^o 1
2. Relación entre valores observados y estimados.
Ecuaciones de regresión.
3. Valores observados y estimados para consumo y
producción fecal.

APENDICE 1: Desarrollo teórico del Model No 1.



1 = Compartimiento ruminal

2 = Compartimiento gastro-intestinal

3 = Compartimiento vascular

M_i = Cantidad de alimento en el compartimiento i, Kgrs.

p_{ij} = Tasa de intercambio entre compartimientos i-j

Las ecuaciones diferenciales para describir el modelo son las siguientes:

$$\frac{dY_1}{dX} = \frac{(p_{10} + p_{13} - p_{12})}{M_1} Y_1 - \frac{p_{31}}{M_1} Y_3$$

$$\frac{dY_2}{dX} = \frac{p_{12}}{M_2} Y_1 + \frac{(p_{23} - p_{20})}{M_2} Y_2 - \frac{p_{32}}{M_2} Y_3 \quad [1]$$

$$\frac{dY_3}{dX} = - \frac{p_{13}}{M_3} Y_1 - \frac{p_{23}}{M_3} Y_2 + \frac{(p_{31} + p_{32})}{M_3} Y_3$$

Se puede simplificar provisionalmente el sistema [1] en la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{10} + \rho_{13} - \rho_{12}}{M_1} &= \rho_1 \\ \frac{\rho_{23} - \rho_{20}}{M_2} &= \rho_2 \\ \frac{\rho_{31} + \rho_{32}}{M_3} &= \rho_3 \end{aligned} \quad [2]$$

Integrando [1] se tiene:

$$Y_1(t) = Y_1(0) \left[\beta_1 e^{-\lambda_1 X} + \beta_2 e^{-\lambda_2 X} + \beta_3 e^{-\lambda_3 X} \right] \quad [3]$$

para la concentración del indicador en el rumen.

$$Y_2(t) = \frac{Y_1(0)}{M_2} \left[\gamma_1 e^{-\lambda_1 X} + \gamma_2 e^{-\lambda_2 X} + \gamma_3 e^{-\lambda_3 X} \right] \quad [4]$$

para la concentración fecal del indicador en que:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{\rho_2 \rho_3 - \rho_{23} \rho_{32} / M_2 M_3 + \lambda_1 (\rho_2 + \rho_3) + \lambda_1^2}{(\lambda_2 - \lambda_1) (\lambda_3 - \lambda_1)} \\ \beta_2 &= \frac{\rho_2 \rho_3 - \rho_{23} \rho_{32} / M_2 M_3 + \lambda_2 (\rho_2 + \rho_3) + \lambda_2^2}{(\lambda_1 - \lambda_2) (\lambda_3 - \lambda_2)} \\ \beta_3 &= \frac{\rho_2 \rho_3 - \rho_{23} \rho_{32} / M_2 M_3 + \lambda_3 (\rho_2 + \rho_3) + \lambda_3^2}{(\lambda_1 - \lambda_3) (\lambda_2 - \lambda_3)} \end{aligned} \quad [5]$$

$$\begin{aligned}
 \gamma_1 &= \frac{\rho_3 + \rho_{13}\rho_{32} / \rho_{12} M_3 - \lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} \\
 \gamma_2 &= \frac{\rho_3 + \rho_{13}\rho_{32} / \rho_{12} M_3 - \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} \\
 \gamma_3 &= \frac{\rho_3 + \rho_{13}\rho_{32} / \rho_{12} M_3 - \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}
 \end{aligned}
 \tag{67}$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = -(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)$$

$$\lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3 = \rho_1\rho_2 + \rho_1\rho_3 + \rho_2\rho_3 - \frac{\rho_{13}\rho_{31}}{M_1M_3} - \frac{\rho_{23}\rho_{32}}{M_2M_3} \tag{7}$$

$$\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = -\rho_1\rho_2\rho_3 + \frac{\rho_1\rho_{23}\rho_{32}}{M_2M_3} + \frac{\rho_2\rho_{13}\rho_{31}}{M_1M_3} - \frac{\rho_{12}\rho_{23}\rho_{31}}{M_1M_3}$$

se tienen las siguientes incógnitas:

$$M_1, M_2, M_3, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_{13}, \rho_{31}, \rho_{23}, \rho_{32}, \rho_{12}, \rho_{10}, \rho_{20}$$

El contenido del rumen M_1 se puede obtener como sigue:

$$M_1 = \frac{\text{dosis del indicador}}{Y_{1(0)}} \tag{8}$$

en que $Y_{1(0)}$ se obtiene de la ecuación 3 haciendo $X=0$. La dosis del indicador es una cantidad conocida.

Quedan por consiguiente 12 incógnitas, siendo necesarias 12 ecuaciones para encontrar estos valores. Estas ecuaciones son proporcionadas por los sistemas [2], [5], [6] y [7].

Por consiguiente el modelo tiene completa solución matemática siendo necesario obtener los siguientes datos de campo:

- 1) Concentración del indicador en el rumen, en función del tiempo ecuación [3].
- 2) Concentración de indicador en las heces, en función del tiempo ecuación [4].

El modelo puede ser sometido a comprobación experimental comparando: a) el consumo del alimento medido directamente con el valor ρ_{01} obtenido en forma indirecta con la ecuación:

$$\rho_{01} = \rho_{10} + \rho_{12} + \rho_{13} - \rho_{31} \quad [9]$$

b) la producción fecal medida directamente con el valor ρ_{20} obtenido en forma indirecta.

APENDICE 2. Relación entre valores observados y estimados. Kg por día.

Ecuaciones de regresión.

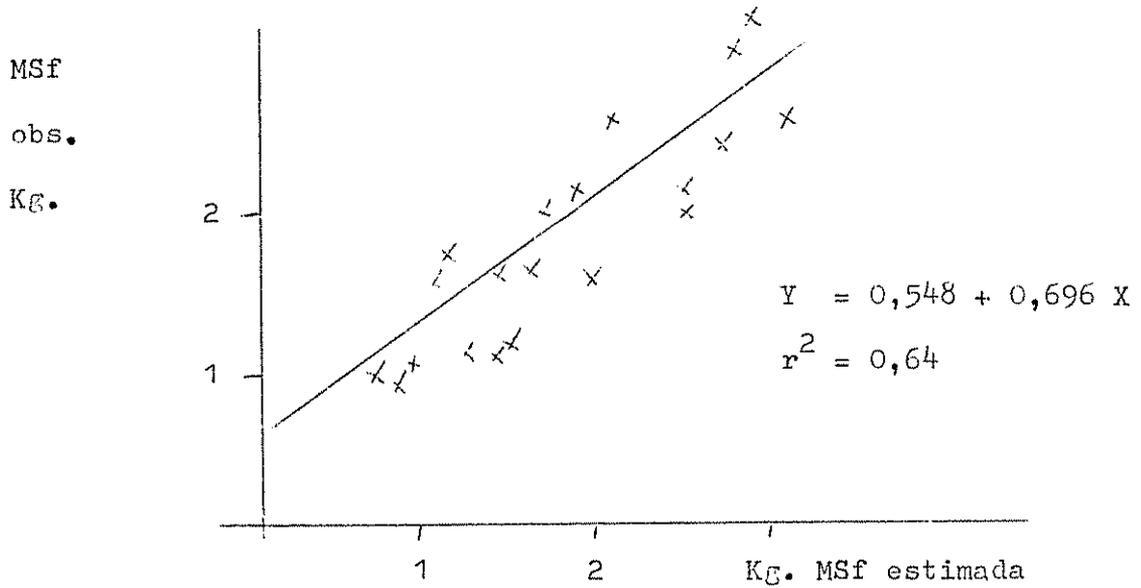


Fig. 1. Relación entre MSf observada y estimada por modelo 4, dosis múltiple, papel.

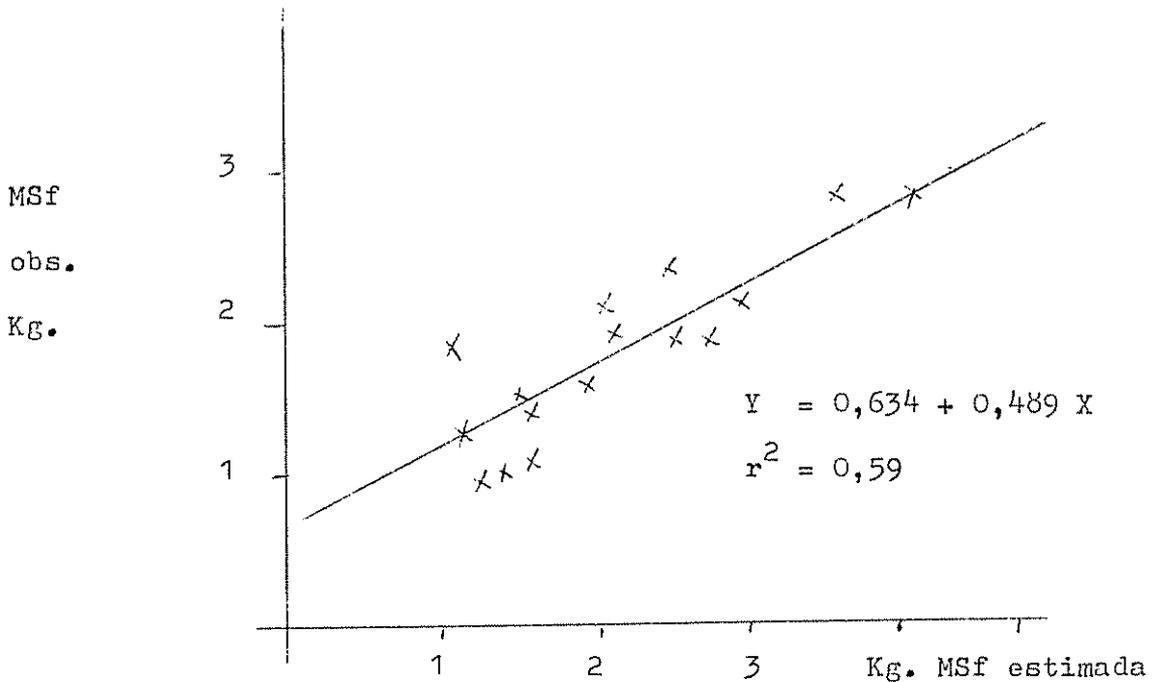


Fig. 2. Relación entre MSf observada y estimada por modelo 4, dosis múltiple, harina.

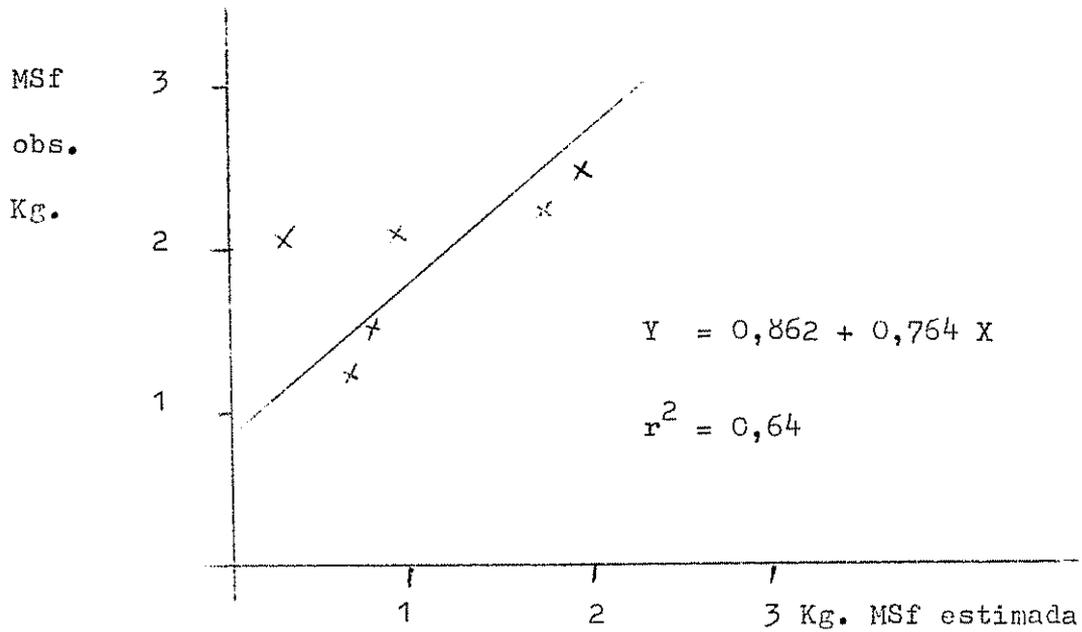


Fig. 3. Relación entre MSf observada y estimada por modelo 5, dosis única, papel cromado

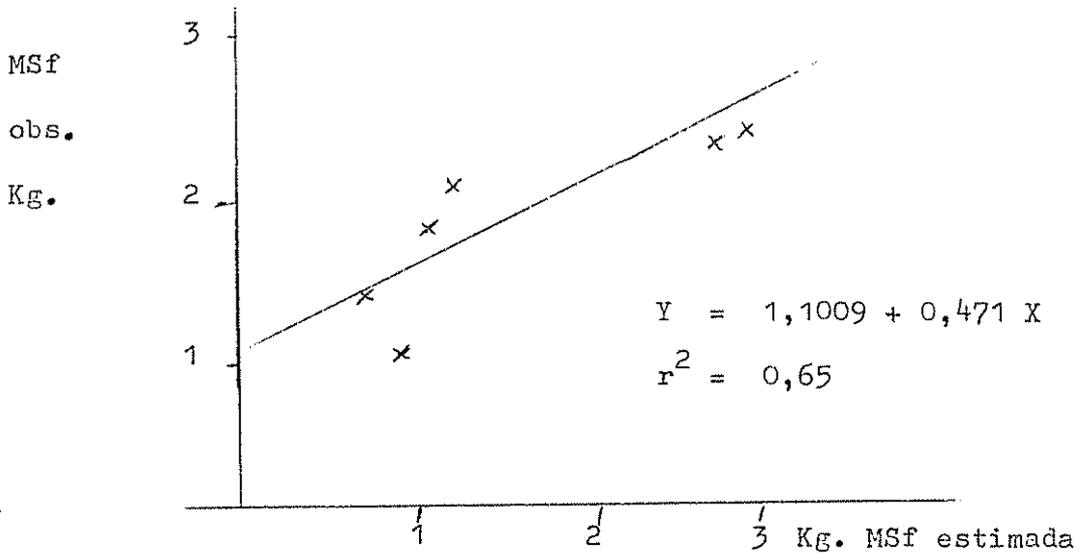


Fig. 4. Relación entre MSf observada y estimada por modelo 6, dosis múltiple, papel cromado

APENDICE 3. Valores observados y estimados de consumo y producción fecal.

Cuadro 1. Valores de consumo observado y estimado por modelo 2 con indicador en papel y en harina. MSc Kg por día.

Indicador en papel			Indicador en harina		
Animal Nº	Observado	Estimado	Animal Nº	Observado	Estimado
K01-UPAI	7,69	8,90	344-UHAI	7,37	17,68
391-UPAII	5,27	8,61	A08-UHAII	4,14	10,05
187-UPAIII	8,49	10,86	448-UHAIII	6,96	3,71
888-UPAIV	4,22	12,75	631-UHAIV	4,42	9,66
877-UPAV	5,04	2,69	F05-UHAV	5,66	2,74
K12-UPBI	7,58	13,41	A12-UHABI	6,29	8,36
806-UPBII	5,66	13,67	A06-UHBII	4,48	9,00
A48-UPBIII	6,4	6,38	976-UHBIII	6,14	21,10
A41-UPBIV	4,09	3,42	269-UHBIV	3,32	14,90
A59-UPBV	4,15	2,28	A39-UHBV	4,81	2,38
K23-UPCI	5,20	7,88	A29-UHCI	4,93	5,17
A75-UPCII	4,00	4,11	A72-UHCII	3,76	6,94
H08-UPCIII	6,81	3,45	L21-UHCIII	5,50	2,36
A29-UPCIV	2,74	9,73	H11-UHCIV	3,34	10,31
H14-UPCV	3,43	1,97	A79-UHCV	3,41	2,63
F41-UPDI	3,83	7,75	F44-UHDI	4,01	4,56
988-UPDII	1,87	2,56	938-UHDII	1,86	3,24
941-UPDIII	3,21	1,53	960-UHDIII	3,50	8,81
953-UPDIV	2,07	1,77	971-UHDIV	2,33	5,02
910-UPDV	2,96	1,51	938-UHDV	3,62	11,58

Cuadro 2. Valores de consumo observado y estimado por el modelo 2, con indicador en papel cromado, dosis única. MSc Kg por día.

Animal Nº	Consumo de materia seca	
	Observado	Estimado
344	6,20	0,93
713	5,53	32,24
K23	6,33	26,21
A29	4,83	0,78
L21	6,31	364,23
I17	4,06	74,51

Cuadro 4. Producción fecal observada y estimada por el modelo 2, con papel cromado, dosis única. MSf Kg por día.

Animal Nº	Producción fecal	
	Observada	Estimada
344	1,76	0,63
713	1,16	1,34
K23	1,64	1,37
A29	1,91	0,58
L21	2,13	4,77
I17	0,96	1,52

Cuadro 3. Valores de producción fecal observados y estimados por modelo 2 en dosis única y usando papel y harina.
MSf Kg/día.

Indicador en papel			Indicador en harina		
Animal N°	Observado	Estimado	Animal N°	Observado	Estimado
K01-UPAI	3,39	5,60	344-UHAI	3,15	9,55
391-UPAII	4,48	5,31	A08-UHAII	1,29	10,79
187-UPAIII	2,30	7,22	448-UHAIII	2,19	8,02
888-UPAIV	2,42	6,92	631-UHAIV	3,25	6,11
877-UPAV	1,56	2,03	F05-UHAV	1,38	2,23
K12-UPBI	2,86	6,64	A12-UHBI	2,76	5,19
806-UPBII	2,48	8,16	A06-UHBII	1,54	5,83
A48-UPBIII	2,02	3,99	976-UHBIII	1,60	11,39
A41-UPBIV	1,88	2,52	269-UHBIV	1,64	8,41
A59-UPBV	1,46	1,82	A39-UHBV	1,51	2,00
K23-UPCI	2,30	4,30	A29-UHCI	2,40	3,50
A75-UPCII	1,89	2,73	A72-UHCII	1,52	4,26
H08-UPCIII	1,47	2,47	L21-UHCIII	2,14	1,93
A29-UPCIV	1,87	5,46	H11-UHCIV	2,09	5,71
H14-UPCV	1,07	1,42	A79-UHCV	1,22	2,09
F41-UPDI	1,59	4,12	F44-UHDI	1,91	2,96
998-UPDII	0,78	1,77	938-UHDII	0,82	2,29
941-UPDIII	1,02	1,22	971-UHDIII	1,29	4,83
953-UPDIV	1,04	1,41	971-UHDIV	1,48	3,14
910-UPDV	1,09	1,19	938-UHDV	0,90	6,13

Cuadro 5. Valores de producción fecal observados y estimados por modelo 4, dosis múltiple, con indicador en papel y harina Kg por día.

Indicador en papel			Indicador en harina		
Animal N°	Observado	Estimado	Animal N°	Observado	Estimado
239-IPAI	2,13	2,09	888-IHAI	2,94	4,20
769-IPAI	1,59	1,98	389-IHAII	1,81	3,81
K01-IPAI	2,46	3,18	344-IHAIII	1,53	2,89
448-IPAIV	2,12	2,41	K18-IHAIV	1,94	2,67
344-IPAV	2,26	2,61	239-IHAV*	--	--
665-IPBI	3,32	2,06	269-IHBI	2,86	3,73
798-IPBII	1,52	1,68	L16-IHBII	1,90	1,24
H07-IPBIII	2,53	2,11	A12-IHBIII	2,14	3,02
904-IPVIV	1,70	1,88	993-IHBIV	2,02	2,75
K12-IPBV	2,32	1,10	665-IHBV*	---	--
L13-IPCI	2,30	2,52	A77-IHCI	1,89	2,28
F24-IPCII	1,73	1,13	H15-IHCIII	1,58	2,06
F19-IPCIII	1,99	2,54	H12-IHCIII	2,40	2,65
F23-IPCIV	1,43	1,43	L20-IHCIV	1,43	1,67
A61-IPCV	1,90	1,81	A66-IHCV	2,09	2,20
J15-IPDI	1,43	1,13	H27-IHDI	1,37	1,60
910-IPDII	0,82	0,70	947-IHDII	0,97	1,35
972-IPDIII	1,02	1,38	932-IHDIII	1,21	1,71
998-IPDIV	0,84	0,83	941,IHDIV	0,96	1,55
971-IPDV	1,19	1,28	953-IHDV*	--	--

* Animales que no convergieron en el ajuste interactivo.

Cuadro 6. Producción fecal observada y estimada por el modelo 5, papel cromado con dosis múltiple. MSf Kg. por día.

Animal N ^o	Producción fecal	
	Observada	Estimada
A03	2,15	0,43
A61	2,30	1,93
A66	2,12	1,74
L13	2,14	0,98
I19	1,39	0,76
I21	1,09	0,78

Cuadro 7. Producción fecal observada y estimada por el modelo 6, papel cromado con dosis única. MSf Kg por día.

Animal N ^o	Producción fecal	
	Observada	Estimada
344	2,02	1,12
713	1,41	0,72
K23	1,85	1,16
A29	2,44	2,84
L21	2,32	2,75
I17	0,99	0,91