

03095

2  
Lej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES  
UNIDAD ACADÉMICA  
DE LOS CICLOS PROFESIONAL Y DE POSGRADO

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS FACTORES DE  
EMISIÓN DE METANO POR EXCRETAS DE BOVINO EN  
MÉXICO**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS (FÍSICA DE LA ATMÓSFERA)  
P R E S E N T A  
M. EN C. EUGENIO GONZÁLEZ AVALOS

MÉXICO, D.F., [REDACTED]

TESIS CON  
FALLA DE ORDEN

274787

1999



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

0001

211 1  
1912 10 1000

## **AGRADECIMIENTOS**

*Se agradece profundamente a las siguientes personas e Instituciones:*

- *Al Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez, por la dirección de este trabajo.*
- *Al Dr. Carlos Gay García, por sus comentarios durante el desarrollo de este estudio y por la revisión del texto final..*
- *Al Mtro. Armando Báez Pedrajo, por sus sugerencias para mejorar la metodología y por la revisión del texto final.*
- *A la Dra. Ma. Guadalupe Bernal Santos, por la revisión de todos los trabajos desarrollados durante el posgrado y el texto final.*
- *Al Dr. Ernesto Jáuregui Ostos, por sus acertados comentarios.*
- *Al Dr. Gilberto Díaz González, por la revisión del texto final.*
- *Al Dr. Omar Masera Cerutti, por sus comentarios para mejorar la presentación del texto.*
- *Muy especialmente al Dr. Rigoberto Longoria Ramírez, por haber seguido con interés el desarrollo experimental de este estudio, así como por los consejos y sugerencias recibidas.*
- *Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para realizar los estudios de doctorado.*
- *Al Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo (PNUD) por el apoyo económico brindado a este proyecto en general (Proyecto MEX/95/G31/A/IG/99).*
- *Al Programa de Apoyo a Estudios de Posgrado (PAEP) de la UNAM, por el apoyo económico para la colecta de muestras.*
- *Al Dr. Rafael Villalobos P., por permitir usar los espacios físicos en donde se ubicaron los dispositivos experimentales.*
- *Al Quím. José Manuel Hernández, por su apoyo en cromatografía de gases.*
- *Al Dr. Antonio Díaz Cruz, Quím. Ma. Antonieta Aguirre García, Sr. Martín Flores y Sr. Manuel Angulo, por el Análisis Químico Proximal de la muestras.*
- *Al personal administrativo del Centro de Ciencias de la Atmósfera, en particular a la C.P. Ma. Martha Zárate M. y a Don Francisco García, por el apoyo logístico y de transporte brindados.*

- *Al Ing. Alfredo Rodríguez Manjarrez y los Técnicos David Mendoza y Sergio Martínez, por su apoyo en la construcción de los dispositivos experimentales.*
- *Al Ing. Víctor Zarraluqui S., del Departamento de Electrónica de este Centro, por su apoyo en el préstamo y reparación de equipo diverso.*
- *Al Técnico Profesional Moisés Moctezuma, por su colaboración en el dispositivo de control de temperatura.*
- *Al Sr. Sergio Pérez Avalos, por sus comentarios y sugerencias sobre el sistema de enfriamiento.*
- *A todos los ganaderos, grandes y pequeños, que amablemente proporcionaron las muestras para este estudio.*

*A la memoria de mi padre:  
Virgilio González García  
Quien continúa siendo el guía de mis pasos.*

*A mi madre:  
Consuelo Avalos López  
Con el cariño de tu hijo.*

*A toda mi familia en general  
Por creer en mí. Gracias.*

## CONTENIDO

	INDICE DE ANEXOS, TABLAS Y FIGURAS	i
I.	INTRODUCCIÓN	1
	I.1 El efecto invernadero y el metano	1
	I.1.1 Antecedentes	1
	I.1.2 Radiación y atmósfera	2
	I.1.3 Potenciales de calentamiento global	6
	I.2 Bioquímica del proceso de fermentación	8
	I.3 Otros estudios sobre factores de emisión	12
	I.4 El ganado bovino en México	14
II.	METODOLOGÍA	16
	II.1 Colecta de muestras	17
	II.2 Baño térmico	18
	II.3 Dispositivo para fermentar muestras	19
	II.4 Dispositivos de enfriado y calentamiento	20
	II.5 Dispositivo para el control de temperatura	22
	II.6 Dispositivo para el secado de las muestras	22
	II.7 Calibración de las medidas de presión	24
	II.8 Dispositivo para medir la presión del gas	24
	II.9 Procedimiento para la fermentación de muestras y medidas de presión	25
	II.10 Cuantificación del gas producido	26
	II.11 Cromatografía de gases y concentración de CH <sub>4</sub>	27
	II.12 Cálculo de los factores de emisión de metano	30
	II.13 Masa óptima de las muestras	30
	II.14 pH de las muestras	31
	II.15 Análisis químico de las muestras	32
	II.16 Potenciales máximos de producción y Factores de Conversión de metano	35
III.	DATOS EXPERIMENTALES	37
	III.1 Datos de presión	37
	III.2 Datos cromatográficos	38
	III.3 Datos de producción de metano	40
	III.4 Datos de pH	42
	III.5 Datos del análisis químico de las muestras	42
	III.6 Análisis de incertidumbres	43
IV.	RESULTADOS	46
	IV.1 Efecto de la congelación de las muestras	46
	IV.2 Análisis químico proximal	47
	IV.3 Modelación matemática del secado de las muestras	50
	IV.4 Variación de la presión y las concentraciones de metano	51
	IV.5 Emisiones de metano como función del tiempo y la humedad	52
	IV.6 Efecto del pH en las emisiones de metano	54

IV.7	Factores de emisión	56
	IV.7.1 Factores de emisión en climas fríos	57
	IV.7.2 Factores de emisión en climas templados	59
	IV.7.3 Factores de emisión en climas cálidos	64
	IV.7.4 Factores de emisión por fermentación en laguna anaeróbica	70
IV.8	Emisiones de metano por sistemas y funciones de producción	72
	IV.8.1 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado	73
	IV.8.2 Emisiones de metano por excretas de sistemas semi-intensivos	73
	IV.8.3 Emisiones de metano por excretas de bovinos de engorda	74
	IV.8.4 Emisiones de metano por excretas de bovinos en pastoreo	74
IV.9	Potenciales máximos de producción y Factores de Conversión de Metano	75
V.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	77
VI.	CONCLUSIONES	83
VII.	REFERENCIAS	86

## INDICE DE ANEXOS, TABLAS Y FIGURAS

### ANEXOS

- 1 Cuestionario sobre las características del ganado bovino para la determinación de los factores de emisión de metano por excretas, como función de los climas en México.
- 2 Relación entre presión y voltaje.
- 3 Fermentación de muestras y medición del gas producido.

### TABLAS

- 1 Lugares de colecta de muestras.
- 2 Análisis químico proximal de excretas de bovino.
- 3 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, a 12°C.
- 4 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, a 12°C.
- 5 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, a 12°C.
- 6 Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 12°C.
- 7 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, a 17°C.
- 8 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, a 17°C.
- 9 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, a 17°C.
- 10 Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 17°C.
- 11 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, a 21°C.
- 12 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, a 21°C.
- 13 Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 21°C.
- 14 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, a 22°C.

- 15 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, a 22°C.
- 16 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, a 22°C.
- 17 Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 22°C.
- 18 Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 27°C.
- 19 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, a 27°C.
- 20 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima cálido, a 27°C.
- 21 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima templado, a 27°C.
- 22 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, en clima templado, a 27°C.
- 23 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, en clima cálido, a 27°C.
- 24 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, en clima templado, a 35°C.
- 25 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima templado, a 35°C.
- 26 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima cálido, a 35°C.
- 27 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, en clima templado, a 35°C.
- 28 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, en clima cálido, a 35°C.
- 29 Emisiones de metano por bovinos de engorda, semi-intensivo, en clima cálido, a 35°C.
- 30 Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 35°C.
- 31 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima cálido. Laguna anaeróbica, a 35°C.
- 32 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, en clima templado. Laguna anaeróbica, a 35°C.

- 33 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima templado. Laguna anaeróbica, a 35°C.
- 34 Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, con alimentación especial, en clima templado. Laguna anaeróbica., a 35°C.
- 35 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, en clima templado. Laguna anaeróbica, a 35°C.
- 36 Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo. Laguna anaeróbica, a 35°C.
- 37 Factores de Emisión de Metano, en  $\text{kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$ .
- 38 Emisiones de Metano, en  $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{kg SV}$ .
- 39 Factores de Conversión de Metano (FCM), en %.

## FIGURAS

- 1 Dispositivo experimental de fermentación.
- 2 Baño térmico.
- 3 Contenedor con tapa.
- 4 A. Depósito y Resistencia. B. Bomba de agua. C. Unidad de enfriamiento.
- 5 Circuito para el Control de Temperatura.
- 6 Dispositivo para el Control de Temperatura.
- 7 Secador.
- 8 Circuito para el registro de la presión producida.
- 9 Relación entre presión y voltaje utilizando transductor y manómetro.

- 10 Red de Conductos.
- 11 Cromatógrafo de Gases.
- 12 Respuesta del cromatógrafo a diferentes cantidades de metano puro.
- 13 Relación entre concentraciones de metano y alturas de cromatogramas.
- 14 Variación de la altura de cromatogramas con el tiempo, para tres masas de excretas.
- 15 Componentes de la materia seca del estiércol, por sistemas de producción y clima.
- 16 Energía contenida en excretas de bovino, por sistema de producción y clima.
- 17 Variación de la masa con el tiempo de secado. 21 °C.
- 18 Variación de la presión diaria, con el tiempo de fermentación. 21 °C.
- 19 Variación diaria de la concentración de metano, con el tiempo de fermentación. 21 °C.
- 20 Emisiones diarias de metano como función del tiempo de fermentación. 12 °C.
- 21 Emisiones diarias de metano como función de la humedad. 12 °C.
- 22 Variación del pH de excretas con el tiempo de fermentación. 20 °C.
- 23 Variación del pH de excretas con el tiempo, fermentadas en laguna anaeróbica a 35 °C.
- 24 Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 12 °C.
- 25 Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 17 °C.
- 26 Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 21 °C.
- 26 Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 22 °C.
- 28 Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 27 °C.
- 29 Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 35 °C.
- 30 Metano emitido por muestras de excretas (100 g), fermentadas en laguna anaeróbica a 35 °C.
- 31 Metano emitido por excretas de bovino lechero estabulado, con secado a varias temperaturas.

- 32 Metano emitido por excretas de bovino lechero semi-estabulado, con secado a varias temperaturas.
- 33 Metano emitido por excretas de bovino de engorda, en producción intensiva, con secado a varias temperaturas.
- 34 Metano emitido por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, con secado a varias temperaturas.

# **I. INTRODUCCIÓN**

## **I.1 El efecto invernadero y el metano**

### **I.1.1 Antecedentes**

Antes de concluir el siglo XVIII, Horace-Benedict de Saussure construyó un aparato formado por cinco cajas de vidrio metidas unas en otras y provistas de termómetros. Al incidir la radiación solar sobre el aparato, se dio cuenta de “el efecto del calor solar sobre el aire contenido por envolturas transparentes”. Este efecto fue observado por Fourier, quien concluyó que, según sus palabras, “así es como la temperatura aumenta a causa de la interposición de la atmósfera, porque el calor encuentra menos obstáculos para penetrar en el aire, cuando se encuentra en estado de luz, que los que encuentra para volver a él cuando se ha convertido en calor obscuro”.

En 1824 Joseph Fourier declaraba que “los movimientos del aire, las aguas, la extensión de los mares, la elevación y la forma del suelo, los efectos de la industria humana y todos los cambios accidentales de la superficie terrestre modifican las temperaturas en cada clima.”

John Tyndall (1861) publicó un estudio sobre la teoría del efecto invernadero. Este estudio estuvo basado en sus investigaciones sobre los glaciares y en los trabajos de observación de Saussure, Fourier, Pouillet y Hopkins relativos a la transmisión de la luz solar y el calor emitido por la superficie terrestre a través de la atmósfera. En este trabajo, Tyndall afirmaba que al ocurrir pequeños cambios en la composición química de la atmósfera podría haber cambios climáticos importantes. También reconocía que el vapor de agua y el ácido carbónico eran los responsables del efecto invernadero. Más tarde, Svante Auguste Arrhenius (1896), vinculó el incremento de este efecto a la utilización de los combustibles fósiles por la sociedad industrial, al situar el problema dentro del ciclo geoquímico del carbono.

Así entonces, a pesar de que desde inicios del siglo XIX se tenía una idea más o menos clara de la existencia del efecto invernadero, provocado por algunos gases de la atmósfera de nuestro planeta, y no obstante el gran desarrollo de la mecánica cuántica en la primera mitad de este siglo, es hasta la década de los cincuentas que se empiezan a dar los primeros avances sistemáticos en los modelos que explican con profundidad el calentamiento de la atmósfera por un aumento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero, incluyendo el metano, ya que su presencia fue descubierta en la atmósfera hasta 1948. Así mismo, se sabe que su concentración ha aumentado de 0.650 ppm a 1.690 ppm durante los últimos 200 años aproximadamente, como resultado de las emisiones originadas por actividades humanas (Harriss, 1989).

### **I.1.2 Radiación y atmósfera**

De la radiación que llega a la tierra proveniente del sol, el 31% es reflejada al espacio, el 26 % es absorbida por la atmósfera y el 43% la absorbe la superficie de la tierra. Luego de absorber la radiación solar, la tierra emite radiación infrarroja, parte de la cual es atrapada por algunos de los gases de la atmósfera, como el metano (1.69 ppmv). Estos gases son llamados de efecto invernadero porque al atrapar una parte de la radiación infrarroja provocan que la temperatura atmosférica sea mayor a la que existiría en ausencia de tal efecto (Goody y Young, 1989).

Se considera que al penetrar la radiación solar en la atmósfera, en el equilibrio radiativo existe una distribución de radiación y temperaturas a través del medio, que depende de las características de la radiación y del tipo de gases presentes y sus concentraciones. En el equilibrio radiativo se cumple que  $F_t + F_s = 0$ , donde  $F_t$  es la radiación térmica emitida al exterior por el sistema Atmósfera-Tierra y  $F_s$  es la radiación solar absorbida por el planeta. En el equilibrio radiativo-convectivo se toma en

cuenta que la convección del aire interviene para neutralizar espontáneamente la estratificación inestable causada por la transferencia de radiación. Los modelos radiativo-convectivos consideran que el equilibrio en el flujo de radiación del exterior hacia la Tierra y de la Tierra al exterior se da por absorción y emisión de radiación y por convección a través de la circulación de los vientos. Se considera además que la circulación en la troposfera influye en la disminución de la diferencia de temperatura del ecuador al polo en la atmósfera baja. Una fuerte circulación en la troposfera puede influir en la disminución de masas de aire cálido en la atmósfera media. El calentar la parte más baja de una capa atmosférica mientras su interior se enfría, es el mecanismo para inducir una inestabilidad convectiva, además de turbulencia. En la atmósfera terrestre la evaporación del agua de su superficie y su posterior condensación en cualquier lugar complica el intercambio de calor. La transferencia turbulenta de calor y la condensación de agua provocan un déficit de energía radiativa en la atmósfera. Con los modelos radiativo-convectivos se calcula, entre otros, el perfil de temperaturas como función de la altura y las concentraciones de los gases presentes en las diferentes capas de la atmósfera (Salby, 1996). Se calcula además el forzamiento radiativo del sistema superficie-troposfera, debido entre otras causas, al cambio en las concentraciones de gases de efecto invernadero, aerosoles en la troposfera y estratosfera.

El forzamiento radiativo se define como el cambio en la irradiancia neta (en  $Wm^{-2}$ ) en la troposfera, luego de permitir que las temperaturas en la estratosfera se reajusten al equilibrio radiativo, pero con valores fijos en las temperaturas de la superficie y troposfera. Si el forzamiento radiativo global medio es  $\Delta F [Wm^{-2}]$  y la temperatura global media en superficie que resulta es  $\Delta T_s [K]$ , entonces:

$$\Delta T_s = \lambda \Delta F \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es un parámetro de sensibilidad climático, en  $K/Wm^{-2}$ , determinado por procesos tales como

la retroalimentación de vapor de agua, retroalimentación de nubes y retroalimentación del albedo de regiones cubiertas de nieve (Shine et al, 1994).

De acuerdo al modelo unidimensional radiativo-convectivo de Rind y Lacis (1993), un caso sin retroalimentación es aquel en el que las nubes, el vapor de agua y el albedo superficial permanecen fijos. Y se cumple que:

$$\Delta t_o = \lambda_o \Delta F \quad (2)$$

donde  $\lambda_o$  es la sensibilidad climática en ausencia de retroalimentación y  $\Delta F$  es el forzamiento ajustado.

Otra aproximación alterna es aquella en la que se utiliza el forzamiento instantáneo, dada por:

$$\Delta T_o = \lambda_i \Delta F_i \quad (3)$$

donde la "i" se refiere al forzamiento instantáneo.

A continuación se presentan los valores obtenidos para cada parámetro en este modelo radiativo-convectivo, para el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.

*Cambios de temperatura en superficie, sin retroalimentación y con forzamiento radiativo en la tropopausa ( $\Delta F$ ) y sensibilidad climática ( $\lambda_o$ ).*

Mecanismo de forzamiento	$\Delta T_o$ [k]	$\Delta F_i$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\Delta F$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\lambda_i$ [K/(W/m <sup>2</sup> )]	$\lambda_o$ [K/(W/m <sup>2</sup> )]
CO <sub>2</sub> 300 - 600 ppmv	1.31	4.63	4.35	0.28	0.30
CH <sub>4</sub> 0.28 - 0.56 ppmv	0.16	0.53	0.52	0.30	0.30
N <sub>2</sub> O 0.16 - 0.32 ppmv	0.27	0.96	0.92	0.29	0.30

donde la diferencia entre  $\lambda_i$  y  $\lambda_o$  representa la intensidad y signo del proceso de ajuste, el cual depende de si el cambio en el forzamiento lleva a un calentamiento o un enfriamiento de la estratosfera como consecuencia del incremento o decremento de las emisiones térmicas infrarrojas

desde la estratosfera baja a la troposfera. En la tabla anterior se observa que para un doblamiento de la concentración de metano, de 0.28 a 0.56 ppmv, la estratósfera baja se enfría de modo que el forzamiento ajustado es alrededor del 2% menor que el instantáneo. Es importante resaltar que la sensibilidad  $\lambda$  calculada con el forzamiento ajustado depende muy poco del mecanismo de forzamiento en comparación a la calculada utilizando el forzamiento instantáneo.

Para calcular los forzamientos radiativos existen diversos esquemas de transferencia de radiación, en los cuales los métodos de manejo de nubes, el traslape espectral de gases y el tratamiento del vapor de agua, son manejados de manera diferente en cada esquema. Un esquema es bueno si puede reproducir las irradiancias observadas para un estado observado de la atmósfera. El IPCC (1994), luego de revisar los trabajos de Ellington et al (1991), Shi y Fan (1992), Kratz et al (1993), Lelieveld et al (1993) e IPCC (1990), propuso los valores de la intensidad del forzamiento radiativo para algunos gases de efecto invernadero tomando como referencia al bióxido de carbono, para pequeñas perturbaciones en las condiciones actuales. Dichos valores aparecen en la tabla que sigue.

*Forzamientos radiativos ajustados, debidos al incremento en las concentraciones en la atmósfera, por unidad de masa y molécula.*

Gas	$\Delta F$ por unidad de masa	$\Delta F$ por molécula
CO <sub>2</sub>	1	1
CH <sub>4</sub>	58	21
N <sub>2</sub> O	206	206

Se observa en la tabla que el forzamiento radiativo del metano es 21 veces mayor que el bióxido de carbono por molécula y 58 veces mayor por unidad de masa en relación al mismo CO<sub>2</sub>. Entonces, una pequeña concentración de metano es capaz de elevar eficientemente la temperatura de la

atmósfera del planeta, de ahí la importancia de conocer con certidumbre los factores de emisión de metano y con ello estimar con mayor exactitud las emisiones de este gas.

Por otro lado, existen los modelos de bandas que determinan la interacción entre la radiación y la materia. En un gas la absorción de energía puede ir en un rango o banda de frecuencias. Al ocurrir la absorción de energía por un gas, se genera un espectro compuesto de líneas ordenadas en bandas. Estas bandas están asociadas a la longitud de onda de la radiación incidente. Ello es lo que permite conocer cuánta energía están absorbiendo las moléculas y cuál es el tipo de radiación incidente (Lenoble, 1993).

Una molécula con  $N$  átomos tiene  $3N$  grados de libertad, de los cuales 3 corresponden a la translación del centro de gravedad y si la molécula es no-lineal, 3 a la rotación, de modo que una molécula no-lineal tiene  $3N-6$  modos de vibración. El metano, con 5 átomos, tiene nueve modos normales, pero al considerar su simetría esférica, sólo cuatro son independientes. De estos cuatro modos normales sólo dos,  $\nu_3$  ( $3018.92 \text{ cm}^{-1}$ ) y  $\nu_4$  ( $1310.76 \text{ cm}^{-1}$ ) son activos en el infrarrojo (Goody and Young, 1989).

Por otro lado, de acuerdo a mediciones hechas por el interferómetro-espectrómetro infrarrojo del satélite Nimbus 3, en la región de las bandas de  $7 \times 10^{-4} \text{ cm}$  a  $13 \times 10^{-4} \text{ cm}$  ocurren las emisiones máximas del planeta (70-90 %). El metano absorbe fuertemente en esta región, reforzando con ello el efecto invernadero (Ramanathan, 1987).

### **I.1.3 Potenciales de calentamiento global**

El potencial de calentamiento global (GWP) es el potencial relativo de una emisión específica de un gas de efecto invernadero, para contribuir a un cambio futuro del forzamiento radiativo. Se define

como la integral en el tiempo del forzamiento radiativo, de la liberación instantánea de 1 kg de gas traza, sobre la integral en el tiempo del forzamiento radiativo, de la liberación de 1 kg de gas referencia. Matemáticamente:

$$GWP(x) = \frac{\int_0^{TH} a_x \cdot [x(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [r(t)] dt} \quad (4)$$

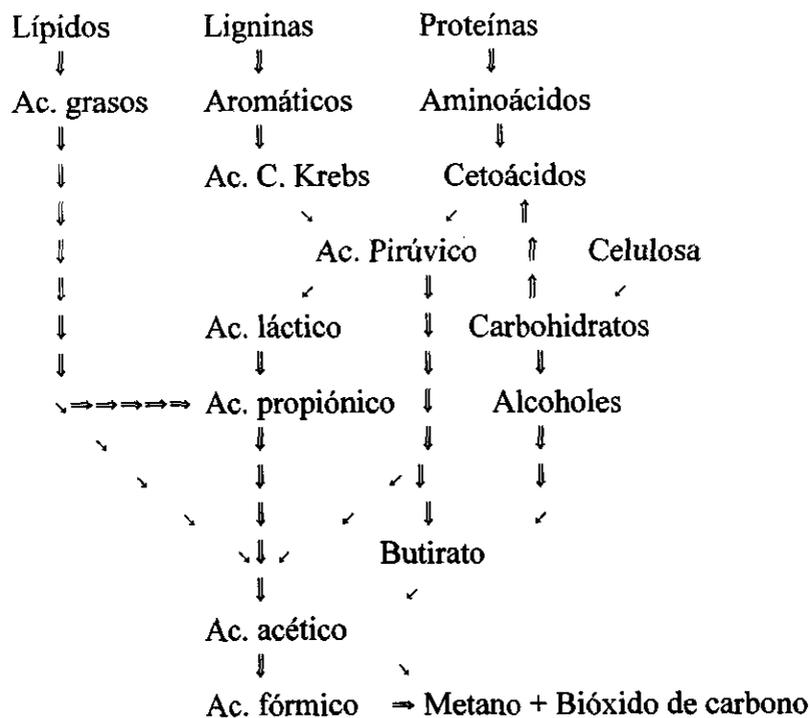
donde TH es el horizonte del tiempo sobre el cual se efectuará el cálculo;  $a_x$  y  $a_r$  son los forzamientos radiativos debidos a un incremento unitario de la concentración atmosférica de cada uno de los gases en cuestión, para el clima referido;  $x(t)$  y  $r(t)$  son los decaimientos en el tiempo de la abundancias de los dos gases. Los forzamientos radiativos ajustados “a” son obtenidos a partir de los modelos de transferencia de radiación infrarroja. Además,  $a_r$  es una función del tiempo cuando se consideran cambios futuros del  $CO_2$ . Las cantidades de gas,  $x(t)$  y  $r(t)$ , que quedan luego de un tiempo  $t$  dependen del tiempo de vida y del tiempo de respuesta del gas en cuestión, así como del gas de referencia.

De acuerdo al modelo de Clerbaux et al (1993), el cambio porcentual en el forzamiento radiativo con retroalimentación de nubes para la molécula de metano es de -8%. El potencial de calentamiento del  $CH_4$  (base masa) referido al potencial de calentamiento global absoluto [AGWP (t)] del  $CO_2$ , es de  $62 \pm 20$ , a 20 años en el horizonte del tiempo y con un tiempo de residencia de  $14.5 \pm 2.5$  años (IPCC, 1994).

## I.2 Bioquímica del proceso de fermentación

Una de las fuentes de metano es la fermentación anaeróbica de excretas de animales. Es un proceso en el que los desechos orgánicos son biológicamente degradados, en ausencia de oxígeno, a productos gaseosos como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y pequeñas cantidades de H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (Stafford, 1980). Este proceso es posible debido a la presencia de microorganismos capaces de utilizar moléculas receptoras de hidrógeno.

En general, el proceso bioquímico de la fermentación anaeróbica se lleva a cabo mediante una serie de reacciones entre diversos compuestos y sistemas enzimáticos. Este proceso puede iniciarse a partir de lípidos, ligninas, proteínas y celulosa, obteniéndose en cada proceso diferentes productos intermedios, pero concluyendo todos ellos en la formación de metano y bióxido de carbono. El siguiente esquema representa cada cadena de reacciones:



Se considera que en la degradación anaeróbica existen tres etapas, dadas por: i) hidrólisis de compuestos de alto peso molecular; ii) formación de ácidos, iii) formación de metano. En la primera etapa interviene la acción hidrolítica de las enzimas como catalizadores en la disociación de la materia orgánica, presente en los sustratos de los desechos, que usan las bacterias en su metabolismo y desarrollo. En esta etapa, intervienen grupos de microorganismos, mismos que mediante sus enzimas extracelulares son capaces de hidrolizar a las sustancias orgánicas complejas de la biomasa, como celulosa, ligninas, lípidos, proteínas, algunos carbohidratos y almidón. Estas sustancias son transformadas en azúcares (glucosa y maltosa), péptidos, aminoácidos y ácidos grasos volátiles, entre otros compuestos orgánicos. La cantidad de disociaciones depende del número de enzimas, de las características de los desechos y de factores como el pH y la temperatura.

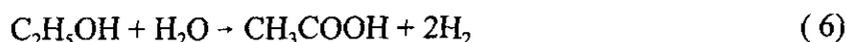
En la segunda etapa las bacterias acidofílicas transforman por fermentación anaeróbica a los azúcares en ácidos orgánicos simples, principalmente en ácido acético, además de ácido propenoico y ácido butírico. Todos estos productos componen el sustrato aprovechable por las bacterias productoras de metano. Las bacterias metanogénicas pertenecen a los siguientes géneros y especies: *Methanobacterium* (*M. formicicum*, *M. bryantii* y *M. thermoautotrophicum*), *Methanobrevibacter* (*M. ruminantium*, *M. arboriphilus* y *M. smithi*), *Methanococcus* (*M. vannielii* y *M. voltae*), *Methanomicrobium* (*M. Mobile*), *Methanogenium* (*M. cariaci* y *M. marishigri*), *Methanospirillum* (*M. hungatei*) y *Methanosarcina* (*M. barkeri*) [Galicia, 1982].

Durante la misma segunda fase se produce hidrógeno, bióxido de carbono, ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y otros productos, como el ácido butírico ( $\text{C}_4\text{H}_7\text{COOH}$ ), el ácido propiónico ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$ ) y alcoholes grasos volátiles como el etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), a partir de glucosa ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) mediante la ecuación:

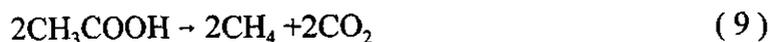


La ecuación (5) está sin balancear porque es posible que hayan más productos.

Otra etapa es la acetogénesis que ocurre a partir de los ácidos grasos volátiles y alcoholes grasos volátiles, formados todos en la etapa anterior, siendo las más importantes:



En la tercera etapa las bacterias productoras de metano transforman al ácido acético, bióxido de carbono e hidrógeno, en metano y bióxido de carbono como productos principales. Las reacciones químicas de dichos procesos están dadas por:



Es de esperarse que cada una de las etapas anteriores ocurran en condiciones particulares, tales que las aceleren o las retarden. Por ejemplo, una acumulación de ácidos grasos volátiles provocará una cinética más lenta en la generación de metano, lo cual puede retardarse por varios días hasta que se alcance un pH propicio para la metanogénesis.

Otros factores que influirán en la etapa final debe ser la concentración de las especies reaccionantes  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ ; ya que altas concentraciones de  $\text{CH}_3\text{COOH}$  favorecerá el proceso, mientras que un alto contenido de  $\text{H}_2$  podría retardar el proceso e inclusive desplazar el equilibrio de las reacciones acetogénicas. Asimismo, altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  influirá en la acidez de la fase líquida debido a la solubilidad de este compuesto.

La eficiencia de los procesos descritos por las ecuaciones anteriores está en función de la estabilidad que provee un adecuado entorno y el balance bioquímico del sistema.

Los principales factores que afectan la estabilidad del proceso biológico involucrado son:

- i) El contacto de los desechos con el oxígeno; ya que la presencia del oxígeno en las reacciones provoca un cero de potencial en la producción de metano.
- ii) El contenido de humedad en los desechos; pues ésta promueve su descomposición anaeróbica durante el metabolismo y multiplicación de las bacterias, además de coadyuvar en la estabilización del pH.
- iii) El pH de los desechos.
- iii) Los nutrientes contenidos en los desechos; ya que la proliferación bacteriana productora de metano depende de la disponibilidad de nutrientes tales como nitrógeno, fósforo y azufre.
- iv) La temperatura; pues se ha observado que la metanogénesis en desechos animales se lleva a cabo en un rango de temperaturas entre los  $4^\circ\text{C}$  y los  $75^\circ\text{C}$ .

Además de los factores señalados, las emisiones de metano dependen de la cantidad de excretas y del sistema de manejo de desechos (Safley et al, 1992).

### **I.3 Otros estudios sobre factores de emisión**

En México se han hecho dos inventarios de emisiones de metano por la fermentación de desechos de bovinos. En el primer inventario se siguieron las líneas metodológicas propuestas por la EPA, y para el segundo inventario las enunciadas por el IPCC (González Avalos, 1995). Los factores propuestos por la EPA se basan principalmente en la experiencia profesional de los autores (Safley, 1992), mientras que los del IPCC tienen un soporte experimental (Steed y Hashimoto, 1995). En ambos casos los factores de emisión corresponden a hatos de otra latitud, con regímenes alimenticios y climas diferentes a los de México.

Steed y Hashimoto (1995) realizaron una serie de experimentos para determinar los factores de conversión de metano por estiércol de bovino. En su trabajo se menciona que el estiércol provenía de un sólo lugar; el ganado era de una única raza (Holstein), de una función (leche), con sólo un tipo de alimentación (ensilado de maíz, forraje de alfalfa, semilla de algodón y granos) y de un sistema de producción (intensivo).

En cuanto a su metodología, los experimentos se realizan a temperaturas diferentes; sin embargo, no incluyen variaciones en la humedad de las muestras, derivadas del proceso de secado natural, que es lo que espontáneamente les ocurre a las excretas cuando son acumuladas a la intemperie en algún lugar o al quedar dispersas en los pastizales como consecuencia del pastoreo.

En su estudio, el estiércol se obtuvo en grandes cantidades y posteriormente fue mezclado. Se dividió en porciones de 5 kg y se fermentaron a tres temperaturas; algunas muestras fueron utilizadas frescas en la prueba de 30°C, y las demás enfriadas a -15°C para su posterior utilización en las pruebas de 20°C y 10°C.

El aparato usado consistió en una cubeta de polietileno de alta densidad con tapa, como contenedor;

la tapa tenía adaptado un conector de polietileno, unido a una bolsa para la colección de gas. La cantidad de gas producido se midió con una jeringa cilíndrica de metal, de 1000 ml, graduada, con un tapón de hule unido a una barra que funcionaba como émbolo al almacenarse el gas en la bolsa.

Los sistemas de manejo de excretas simulados fueron:

- Pastoreo. Las excretas quedan dispersas y sin manejo alguno en el agostadero.
- Lechada. A las excretas se les adiciona agua y son almacenadas en un tanque, construido en el suelo, por seis o más meses. Luego se esparcen en los cultivos.
- Corral. Las excretas de ganado de engorda quedan depositadas en los corrales con piso de tierra y removidas periódicamente.

La simulación de estos sistemas contempló dos modalidades:

- Contenedor cerrado. Los contenedores permanecieron tapados durante todo el período de fermentación.
- Contenedor abierto. Durante cada semana, los contenedores permanecieron abiertos durante seis días. A partir del séptimo día permanecieron tapados, al término del cual se midió la producción de gas.

Los factores de conversión de metano (FCM), definidos como la fracción del Potencial Máximo de Producción de metano ( $B_0$ ) por tipo de excretas que reportan son:

*Factores de Conversión de Metano (FCM) en U.S.*

Sistema de manejo	30°C	20°C	10°C
Pastoreo / Corral (abierto)	2.0%	0.3%	0.0%
Lechada (cerrado)	75.6%	55.3%	0.2%
Corral (abierto)	2.0%	0.3%	0.0%
Corral (cerrado)	65.5%	45.7%	0.0%

Donde los porcentajes están referidos al  $B_0$  obtenido en sus experimentos. Cabe señalar que como

cada sistema de manejo de excretas está vinculado a un sistema de producción, y este a su vez está caracterizado por el tipo de alimento, entonces para los sistemas de pastoreo y corral, los FCM deben tomarse con reserva, debido a que no hubo variación en las dietas respectivas.

Así mismo, al existir una estrecha relación entre los factores propuestos por el IPCC (1996) y los obtenidos por Steed y Hashimoto (1995), entonces su aplicación al caso de México no es recomendable, debido a las características climáticas y de producción pecuaria propias, y porque además de los sistemas de manejo de excretas por pastoreo y corral ya descritos, en el país predomina el sistema de almacenamiento; en el cual las excretas permanecen por períodos de 1 a 180 días, en pilas o estercoleros fuera del establo, para posteriormente ser esparcidas en los campos agrícolas como fertilizante.

En este trabajo se presentan los factores de emisión de metano por excretas de bovino procedentes del Distrito Federal y de los Estados de Hidalgo, México, Morelos, Querétaro y Tlaxcala. Los factores fueron obtenidos con una metodología experimental propia, la cual contempla el efecto de la temperatura, la humedad, la alimentación y el manejo de excretas.

#### **1.4 El ganado bovino en México**

La producción de ganado bovino en México se efectúa básicamente utilizando tres sistemas de producción: el intensivo, el semi-intensivo y el extensivo. Estos sistemas mantienen hatos estabulados o en corral, semi-estabulados y no estabulados, respectivamente.

Los sistemas intensivos tienen ganado bovino de razas europeas y cruza especializadas en la producción de carne o leche. Los sistemas semi-intensivos agrupan en esencia ganado de razas cebuínas. En tanto que los sistemas extensivos generalmente mantienen hatos conformados por

ganado de razas de cruzas indefinidas.

En la región central del altiplano con climas de montaña, los sistemas intensivos productores de carne tienen relativamente poca importancia, en contraparte, el ganado lechero especializado y con alta tecnología productiva contribuye en buena medida al total del país. Las razas Holstein y Suizo son las de mayor importancia en la producción de leche. La dieta de estos animales, en general, consiste en forrajes y alimentos balanceados.

En los sistemas semi-intensivos de producción se presenta una dependencia estacional en cuanto a la provisión de alimento, ya que cuando el ganado es semiestabulado, su dieta consiste en pastos, forrajes y un suplemento de alimentos balanceados. Sin embargo, en el caso de pastoreo familiar, el ganado consume pastizales y selectivamente follaje, lo que representa una marcada estacionalidad en la calidad de los nutrientes.

Los sistemas extensivos consisten de animales de doble propósito, de razas de cruzas indefinidas o criollos y cruzas con holstein. Las tierras agrícolas de temporal, en la postcosecha, son usadas para el pastoreo del ganado, proporcionando además una gran cantidad de forraje tosco y esquilmos (Fuente, 1989).

## II. METODOLOGÍA

Al diseñar el dispositivo experimental fue indispensable tener en cuenta la función de la producción (carne, leche o doble propósito) y su relación con los tipos de alimentación, los climas y cultivos de la región, así como los sistemas de producción (intensivo, semi-intensivo o extensivo). Se consideraron además los sistemas de manejo del estiércol, considerando que éstos dependen fundamentalmente del tamaño del hato, de la disponibilidad de agua para los cultivos (riego o temporal) y de la densidad ganadera en la región. En particular, fue necesario tomar en cuenta que las excretas, al permanecer a la intemperie, a su interior ocurre la fermentación anaeróbica, en tanto que el secado se da de las capas externas hacia las internas. Las excretas en este caso presentan al exterior una consistencia sólida y seca. Esta consistencia disminuye conforme se penetra al interior del cuerpo de la excreta. Es evidente que la humedad de cada capa de las excretas desciende con el tiempo hasta alcanzar finalmente el secado total. En principio, el tiempo de secado varía en función de la cantidad de estiércol, de la superficie expuesta a la intemperie y de la humedad y temperatura del ambiente.

Por otro lado, cuando las excretas conservan toda su humedad, el proceso de fermentación incluye al total de las excretas de la muestra respectiva, como ocurre cuando se tiene una laguna anaeróbica, en cuyo caso además se adiciona agua al estiércol.

Durante la fermentación anaeróbica e isotérmica de excretas en un contenedor sellado, de volumen fijo, la producción de gas es proporcional al incremento de presión al interior del contenedor. En la serie de experimentos realizados se midieron, para cada muestra, la cantidad de gas producido por la fermentación, tomando en cuenta el proceso de secado, cuando era el caso; y se cuantificó el metano contenido en el gas producido. El dispositivo experimental de fermentación se presenta en

la fig. 1.

## **II.1 Colecta de muestras**

Una primera etapa del estudio consistió en la identificación y clasificación, previo al experimento, de centros de producción de bovinos, por sub-regiones y climas. De cada uno de los lugares seleccionados para coleccionar las muestras de estiércol, se determinó:

- Ubicación.
- Características del hato:
  - i) Función
  - ii) Sistema de producción
  - iii) Razas
  - iv) Tipo y cantidad de alimento suministrado
  - v) Sistema de manejo de estiércol

La información se recabó con el apoyo de un cuestionario aplicado a los ganaderos de las regiones de donde provinieron las excretas. Este cuestionario aparece en el anexo 1. Los lugares de donde fueron colectadas las muestras se enlistan en la tabla 1.

Durante los recorridos para coleccionar las muestras frescas, éstas se depositaban en bolsas de polietileno para después introducirse en contenedores de poliestireno expandido, con hielo en su interior. De esta forma se lograba que las excretas colectadas no se fermentaran durante los períodos de colecta.

## II.2 Baño térmico

La fermentación se llevó a cabo mediante un sistema de nueve contenedores (fermentadores) cilíndricos sellados, con tapa, inmersos en un baño térmico con circulación de agua, a temperatura constante ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ).

La estructura del baño térmico consistió en dos recipientes, colocado uno dentro del otro, fabricados ambos con placa de acrílico de 1.2 cm de espesor, de dimensiones internas (56 x 56 x 26) cm y (67 x 67 x 37) cm, respectivamente. El hueco entre los recipientes se rellenó con aislante térmico de fibra de vidrio, de 2.54 cm de espesor, con cubierta de aluminio.

Como soporte de los contenedores, al recipiente interior se le colocó una tapa de acrílico, de (56 x 56) cm, hecha con placa de 1.2 cm de espesor, con nueve perforaciones circulares de 11.5 cm de diámetro, distribuidas uniformemente en ternas.

Para lograr una eficiente distribución del agua circulante al interior del baño, al frente del recipiente exterior, en su parte media, se unió horizontalmente un cilindro de acrílico, de 56.0 cm de longitud, 10.2 cm de diámetro y 1.0 cm de espesor, con tapas planas en los extremos. Para el suministro del agua al baño, en la cara circular de ese cilindro se hizo una horadación de 1.9 cm de diámetro, con cuerda estándar. En la misma cara circular del cilindro, pero en el extremo opuesto a la horadación, se insertaron perpendicularmente cuatro conductos de acrílico, de 10.0 cm de longitud y 3.8 cm de diámetro. Estos conductos quedaron dispuestos uniformemente a lo largo del cilindro, atravesando las paredes de ambos recipientes del baño. De este modo el cilindro distribuidor y el baño quedaron unidos y conectados sus interiores perfectamente. Finalmente, el distribuidor de agua se aisló térmicamente con una cubierta de poliestireno expandido de 2.54 cm de espesor.

Para la salida del agua se colocó un conector de espiga con manguera, a través de una horadación de

1.9 cm, practicada en el centro de la parte baja de las caras posteriores de los recipientes que conforman el baño.

Las paredes internas del recipiente interior se cubrieron con placa de poliestireno expandido de 2.54 cm de espesor; así mismo, el interior del baño se subdividió en nueve compartimientos iguales e interconectados, hechos del mismo material. El recipiente exterior del baño contó con una tapa superior removible, integrada por tres placas rectangulares de acrílico independientes, de 0.9 cm de espesor. Cada una de estas placas tenía una horadación rectangular de (56 x 3.5) cm, para permitir la manipulación independiente de cada uno de los contenedores. La figura 2 presenta el esquema del baño térmico utilizado.

### **II.3 Dispositivo para fermentar muestras**

El dispositivo de fermentación consistió en nueve contenedores. Cada contenedor (fermentador) se construyó con tubo de aluminio de 10.16 cm de diámetro interno, 25.0 cm de altura y 6.4 mm de espesor. Se soldó una tapa circular a la parte inferior del tubo, hecha de placa de aluminio de 6.4 mm de espesor. Para la colocación de la tapa removible, alrededor del tubo en su parte superior externa, se hizo una cuerda estándar de 40 hilos y 1.6 cm de altura.

La tapa removible se construyó en placa de acrílico de 13.97 cm de diámetro y 2.54 cm de espesor. A esta placa circular se le hizo una hoquedad cilíndrica centrada, de 10.16 cm de diámetro y 1.6 cm de profundidad. En toda la cara interna circular se hizo una cuerda estándar de 40 hilos, para su ensamble con la cuerda del contenedor. En el fondo de la tapa, alrededor de la cara circular, se hizo un canal de 2.0 mm de altura y 3.0 mm de profundidad, para ayudar a fijar una junta circular de neopreno a la tapa, de 1.5 cm de ancho y 1.5 mm de espesor.

El sello de cada contenedor se conformó con la junta de neopreno y grasa de silicón para alto vacío (Dow Corning) adherida a la junta y a las cuerdas del contenedor y la tapa. Para lograr un buen sellado entre la tapa y el contenedor vía la aplicación de un torque, alrededor de la parte superior externa de la tapa se hicieron muescas circulares con radio de curvatura de 1.0 cm.

Se practicaron sobre cada tapa tres orificios equidistantes y en línea, de 0.95 cm de diámetro, con cuerda estándar, con uno de ellos en el centro. En el orificio del centro se colocó un inserto con septa de silicón sólido, de dureza 30, para la extracción de muestras a analizar en el cromatógrafo de gases. En cada uno de los otros dos orificios se colocó un tubo galvanizado de 5.0 cm de longitud, con cuerda y una válvula de aguja fabricada en bronce. Una de estas válvulas sirvió para la purga del aire al interior del contenedor. En la otra válvula se instaló un conector unido a un conducto de nylon, de 1.6 mm de diámetro interno, para el registro de la presión del gas producido. La figura 3 presenta el esquema del contenedor con su tapa.

#### **II.4 Dispositivos de enfriado y calentamiento**

El sistema de enfriamiento consistió en un depósito cilíndrico de aluminio para agua, de 20 cm de diámetro, 30 cm de altura y 1.5 mm de espesor. El depósito se colocó sobre una plataforma fija de (35 x 35) cm, a un nivel por arriba del tope del baño térmico.

Sobre la cara circular del depósito, en los extremos superior e inferior, se perforaron dos orificios de 2.54 cm de diámetro, defasados 90 grados uno respecto al otro. En cada orificio se instaló un conector con espiga, para manguera de PVC de baja densidad, de 1.9 cm de diámetro interno y 0.5 cm de espesor, para la entrada y salida del agua. La manguera de entrada al depósito se conectó a un extremo de una válvula de paso, unida ésta por el otro extremo a una bomba de agua (Little Giant)

de 1/15 HP. A su vez, la bomba de agua estaba unida, mediante manguera, al conector de salida de agua del baño térmico. El conducto de salida del depósito se conectó, utilizando manguera, a una válvula eléctrica de paso, unida ésta a través de manguera a la entrada del cilindro distribuidor de agua del baño térmico. Así entonces, el agua circulaba del baño al depósito por la acción de la bomba, y pasaba del depósito al baño por efecto de la gravedad.

De un extremo al otro, a lo largo de este depósito, se enrolló en su exterior, perfectamente adherido a su superficie curvada, un conducto flexible de cobre, de 7.9 mm de diámetro externo. Ambos extremos del conducto enrollado se conectaron a una Unidad Hermética de Condensación (UHC) para refrigeración (PERYLSA, 1/4 HP), que funcionaba con freón 12. De esta manera, al circular a lo largo del conducto el freón, el agua en el depósito bajaba su temperatura. Al circular el agua fría del depósito al baño, provocaba un descenso de temperatura del agua del baño térmico. La bomba de agua, la válvula eléctrica y la UHC se conectaron mediante un circuito eléctrico a un sistema de control de temperatura.

El sistema de calentamiento del agua consistió en una resistencia eléctrica de 500 W, en forma de "U", fabricada con tubo de cobre de 0.95 cm de diámetro, 25 cm de longitud y 4.0 cm de ancho. La resistencia se montó sobre una placa circular de cerolón, de 20 cm de diámetro y 1.0 cm de espesor. La placa servía de tapa al depósito descrito en el sistema de enfriamiento. Para la conexión se utilizó alambre calibre 16 de fibra de vidrio para soportar el calentamiento. La resistencia estaba conectada al mismo sistema de control de temperatura. La figura 4 exhibe el depósito, la bomba de agua, la UHC y el sistema de calentamiento utilizados.

## **II.5 Dispositivo para el control de temperatura**

Para la construcción del sistema de control de temperatura se utilizó el material y equipo que sigue:

- Bomba de agua (LITTLE GIANT, 1/5 HP).
- Flotador electrónico de agua (CEISA FLO1-9)
- Termostato digital (CAMPINI 140.210,  $-45^{\circ}\text{C}$  a  $+130^{\circ}\text{C}$ )
- Relevador
- Transformador (50 VA, voltaje primario de 110 VCA y voltaje secundario de 220 VCA)
- Válvula eléctrica de paso para agua

Cuando la temperatura del baño era diferente a la fijada, en  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , automáticamente el termostato digital enviaba una señal eléctrica, vía el relevador, a uno de los dos sistemas, el de enfriado o el de calentamiento, según el caso. Simultáneamente, la válvula eléctrica al recibir la señal respectiva se activaba para iniciar la circulación del agua. El enfriado o calentamiento ocurría mientras el agua circulaba continuamente a través del baño térmico y el depósito. El llenado y vaciado ininterrumpido del depósito, así como la activación de la bomba y la válvula eléctrica, eran controlados mediante el flotador electrónico. El proceso se detenía a los 5 minutos aproximadamente, cuando se alcanzaba la temperatura previamente establecida y el termostato digital enviaba la señal correspondiente. La figura 5 exhibe el circuito eléctrico utilizado y la figura 6 el dispositivo experimental respectivo.

## **II.6 Dispositivo para el secado de las muestras**

Con el fin de observar el efecto de la pérdida de humedad de las muestras de estiércol, sobre la producción de gas durante su fermentación, se diseñó y construyó un secador de muestras.

El secador consistió de un gabinete metálico con tres entrepaños, de (48 x 94 x 130) cm, cubierto

exteriormente con madera de triplay de 6 mm de espesor, ubicado físicamente en un local con variaciones mínimas de su temperatura ambiente. Una de las caras mayores (94 x 130) cm, fue habilitada con puertas. La totalidad del interior, incluida la parte inferior de cada entrepaño, fue recubierta con placa de poliestireno expandido de 10 cm de espesor.

Para asegurar un flujo suficiente de aire al interior del secador, sobre la otra cara mayor se instalaron, con la ayuda de un convertidor de corriente (CONVER-MEX) de 117 VAC a 12 VDC, seis ventiladores de 8 cm de diámetro, de 12 VDC cada uno, dos por cada entrepaño. Sobre cada una de las caras paralelas, de (48 x 130) cm, se instalaron tres ventiladores de 12 cm de diámetro, de 12 VDC.

Para regular la temperatura del secador, cuando la temperatura ambiental media diaria era inferior a la temperatura del proceso de secado, se utilizó una serie de 9 focos de 200 W cada uno. La serie se conectó a un reductor de intensidad (HIRAMI) con capacidad de 2000 W, para controlar la luminosidad de los focos. Con ello se logró mantener al secador a una temperatura constante durante aproximadamente ocho horas continuas, durante el día. Por ello fue necesario ajustar periódicamente la intensidad de los focos. Debido a que durante la noche la intensidad luminosa de los focos no se reguló, el último ajuste de la luminosidad quedaba ligeramente arriba de lo normal, en función del descenso aproximado de la temperatura ambiente hasta el día siguiente.

Si la temperatura de secado era inferior a la temperatura media diaria, entonces en lugar de focos se utilizaron bolsas de gel congelado. Estas bolsas se colocaban al interior del secador, en cantidad suficiente para mantener la temperatura deseada. En la figura 7 aparece el secador diseñado.

En cuanto al método de secado, una vez que las muestras de estiércol eran colectadas y clasificadas y se tenía una mezcla homogénea de ellas, se depositaban 400.0 g en una canastilla cilíndrica calada,

de polietileno, de 8 cm de diámetro y 11 cm de altura. La masa se midió con una báscula de tres brazos (OHAUS), con capacidad de 2,610 g y una resolución de 0.1 g. El proceso de pesar y depositar las muestras en las canastillas se repitió hasta completar la cantidad de muestras a secar.

## **II.7 Calibración de las medidas de presión**

Se propuso determinar la producción de biogas a través de la presión, utilizando para ello a la ecuación general de los gases ideales. Se desarrolló y aplicó el método para la calibración en las medidas de la presión del gas, producido al interior de las cámaras de fermentación.

A fin de medir la presión al interior de las cámaras con suficiente precisión, fue necesario establecer la relación funcional entre la presión registrada por un transductor y las señales de voltaje enviadas por éste a un multímetro. El circuito utilizado se presenta en la figura 8.

Después de realizar la serie de medidas se elaboró una tabla de datos de presión contra voltaje. La gráfica obtenida se presenta en la figura 9. La ecuación representativa es:

$$P = \frac{V}{0.004} \quad (11)$$

El material y equipo utilizado, así como el procedimiento experimental se describe en el anexo 2.

## **II.8 Dispositivo para medir la presión del gas**

Para medir la cantidad de gas producido, las excretas se depositaron en los contenedores para su fermentación por varios días. Durante cada medición, a intervalos de uno a tres días, se tomaron datos de: sistema de producción, temperatura del baño, masa de la muestra, fecha, hora, presión al inicio de la fermentación y presión final.

Para medir la presión se diseñó una red de conductos al interior de un bloque de nylamid con forma de prisma rectangular, de dimensiones (5.3 x 5.3 x 9.0) cm. El bloque contaba con diez entradas para conector, de 0.95 cm de diámetro y cuerda de 40 hilos, distribuidas por pares en las caras rectangulares (laterales) y una entrada en cada una de las bases cuadradas superior e inferior. Todas las entradas estaban intercomunicadas mediante una red de cinco conductos, de 1.6 mm de diámetro, que pasaban de un extremo al otro del bloque. El prisma contaba con un soporte de cuatro patas, fijo a una placa de acrílico de 9 mm de espesor. El soporte estaba hecho de ángulo de aluminio, de (2.5 x 20.0) cm.

En el bloque, nueve de las diez entradas contaban cada una con dos conectores en serie hembra-macho unidos a una válvula de aguja (válvula secundaria). Adicionalmente a estos conectores, tres de las nueve entradas tenían, cada una, un conector en "T" macho-hembra-hembra con una válvula de aguja. De estas tres válvulas, una de ellas servía para el control de la presión del sistema, otra para el suministro de nitrógeno y la última para hacer el vacío al sistema, cuando era necesario. Cada válvula secundaria estaba unida a una válvula de aguja de un fermentador, mediante manguera de nylon de 3 mm de diámetro externo y conectores con bala y barril. La décima entrada del bloque se unió a través de dos conectores, uno en "L" y otro hembra-hembra, al transductor de presión. La figura 10 corresponde al dispositivo experimental descrito.

## **II.9 Procedimiento para la fermentación de muestras y medidas de presión**

Al inicio de la fermentación, el día que se pesaban las muestras frescas para ponerse a secar, se tomaban tres de ellas por cada sistema de producción, y se llevaban a las cámaras de fermentación. Todas esas muestras se dejaban fermentando por un tiempo igual al primer período de secado de

aquellas que permanecían en el secador. Se efectuó el análisis cromatográfico y se midió la presión del gas producido. Posteriormente estas muestras frescas eran desechadas. El proceso se repitió para una remesa de muestras desecadas en el primer período. Durante cada corrida se midió la masa de todas las muestras, y se seleccionaron, para su fermentación en las cámaras, aquellas muestras con menor pérdida de humedad, a fin de que el tiempo de secado total de las muestras fuera aproximadamente el mismo para cada sistema de producción. Este proceso se repitió ininterrumpidamente durante varios períodos. Cesó cuando las muestras se terminaron o cuando el secado era total.

Una vez que las muestras se hubieron fermentado en los botes respectivos dentro del baño térmico, la presión generada por la producción de gas se obtuvo al registrar la presión, al pasar el gas a la red de conductos y activar el circuito descrito en la figura 8. Los procedimientos operativos de fermentación y medida de la presión se describen en el anexo 3.

## II.10 Cuantificación del gas producido

De la ecuación de los gases ideales,  $PV = nRT$ , se tiene que el número de moles de gas producido está dado por:

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (12)$$

donde:

- P Presión ejercida por el gas producido. Es la diferencia entre la presión final y la presión inicial de referencia.
- V Volumen sin ocupar por la muestra en el bote o fermentador, más el volumen de la

red de conductos. El valor de V se obtuvo llenando los fermentadores con agua, estando vacíos primero, y con excretas después. El volumen adicional de la red de conductos se obtuvo indirectamente por el método geométrico.

T Temperatura del baño térmico, en K.

R Constante universal de los gases.

### **II.11 Cromatografía de gases y concentración de CH<sub>4</sub>**

Para determinar la cantidad de metano contenido en el total del gas producido, se utilizó la técnica de cromatografía de gases, por ser una de las técnicas más seguras y de una precisión suficiente para el objetivo perseguido. El cromatógrafo instalado presentó las siguientes características:

- a) Marca: Pye Unicam series 204.
- b) Columna:
  - Tipo: Empacada (proceso realizado personalmente).
  - Material: Acero inoxidable.
  - Longitud: 1.83 m.
  - Diámetro: 4.8 mm de diámetro interno.
  - Fase: Malla molecular 13X.
  - Temperatura: 70 °C.
- c) Señal: 10 mV.
- d) Rango: 1.
- e) Atenuación: 4, 8, 16, 32 y 64.
- f) Inyector:
  - Temperatura: 100 °C.
  - Jeringa (HAMILTON 701, 10 µL): Resolución de 0.2 µL.
- g) Detector:
  - Tipo: Ionización de flama.
  - Temperatura: 125 °C.
- h) Registrador:
  - Marca: LINEAR.
  - Señal: 10 mV.
  - Carta: 1 cm/min.
- i) Gases:
  - Acarreo: Nitrógeno.

- Flujo: 20 ml/min.
- Ignición: Hidrógeno y aire.
  - Hidrógeno:
    - Flujo: 33 ml/min.
  - Aire:
    - Tipo: Zero grado cromatográfico.
    - Flujo: 330 ml/min.

En la figura 11 aparece el cromatógrafo y el registrador utilizados.

A fin de determinar la capacidad de respuesta en función del volumen de las muestras de gas, se inyectaron diferentes cantidades de metano puro (ALPHAGAS) al cromatógrafo. La gráfica obtenida se presenta en la figura 12. El modelo matemático de la recta, que prácticamente pasa por el origen, está dado por:

$$h = 0.563 V \quad (13)$$

donde:

- h      Altura del pico [cm]
- V      Volumen de metano puro inyectado [ $\mu$ L]

Tanto la proporcionalidad directa, como la ordenada al origen tendiente a cero observadas, garantizan que el cromatógrafo tuvo una respuesta adecuada.

Una vez que las muestras se hubieron fermentado era indispensable saber cuánto metano había en el total de gas producido. Es decir, había que determinar una curva de calibración de metano, la cual estableciera la concentración respectiva de  $\text{CH}_4$  para una presión conocida asociada a este gas.

Para obtener la curva de calibración se utilizó un bulbo de vidrio con capacidad de 2005 ml, de forma aproximada a un cilindro, con válvulas en los extremos derecho e izquierdo y una septa de

silicón en la parte superior. En el conector de la válvula derecha se acopló un conducto unido a un tanque de nitrógeno. En el conector de la izquierda se acopló el circuito representado en la figura 8, unido a una válvula de despresurización.

Se purgó el aire del bulbo mediante un flujo de nitrógeno a través de sus válvulas. La presión del nitrógeno en el bulbo quedó por arriba de la presión atmosférica y por debajo de la presión asociada a 5.000 V. Mediante la válvula despresurizadora se redujo la presión en el bulbo hasta un valor correspondiente a 3.200 V. Esta era la presión de referencia. Posteriormente se inyectó metano puro (ALPHAGAS) al bulbo, provocando con ello un incremento en su presión interna.

Para diversas presiones, leídas en el multímetro, se inyectaron muestras de la mezcla de nitrógeno y metano al cromatógrafo, obteniendo de este modo la relación funcional entre la altura de los cromatogramas y la concentración de metano, dada por la ecuación 14. Su gráfica se presenta en la figura 13.

$$C = 0.297 \cdot h \quad (14)$$

donde:

$h$  = altura del cromatograma, en cm.

$C$  = concentración de metano en el bulbo, en %.

Debido a que se tiene la altura de los cromatogramas de las corridas experimentales, es posible entonces calcular las concentraciones de metano, con el modelo de la ecuación (14), en cada uno de los fermentadores.

## II.12 Cálculo de los factores de emisión de metano

Al conocer el número de moles de gas producido y la concentración de metano, se calculó entonces el número de moles de metano presente en el fermentador durante cada corrida. Al sumar los moles de metano producido en cada una de las corridas del proceso completo de secado y fermentación, o bien de fermentación en laguna anaeróbica, se tuvo el total de moles de metano producido.

La cantidad de metano en el fermentador está asociado a la materia seca (MS) del estiércol que se puso a fermentar. Para calcular el metano producido por gramo de MS se aplica la relación:

$$\frac{\text{mg } CH_4}{\text{g MS excretas frescas}} = \frac{\text{mg } CH_4}{\frac{\%MS}{100} \cdot \text{g excretas frescas}} \quad (15)$$

donde MS es la materia seca contenida en el estiércol fresco.

Finalmente, el metano producido, en kg por cabeza al año, se obtuvo mediante la ecuación:

$$\frac{\text{kg } CH_4}{\text{cabeza} \cdot \text{año}} = \frac{\text{mg } CH_4}{10^3 \text{ mg MS excretas frescas}} \cdot \frac{\text{kg excretas frescas}}{\text{cabeza} \cdot \text{día}} \cdot \frac{\%MS}{100} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \quad (16)$$

Los valores obtenidos con la ecuación (16) para cada sistema de producción, en cada clima y sistema de manejo de excretas, corresponden a los factores de emisión de metano respectivos.

## II.13 Masa óptima de las muestras

Es sabido que la cantidad de estiércol que produce un bovino depende de la función de la producción, del tamaño del animal y de la cantidad y digestibilidad de alimento consumido al día.

Para muestras homogéneas de estiércol, se observó durante las corridas prueba que a mayor cantidad

de estiércol correspondía una mayor cantidad de metano producido en una proporción directa.

Por otro lado, se llevaron a cabo algunas corridas para determinar la cantidad óptima de estiércol a fermentar. Se observó que si la cantidad de estiércol era grande (de 1.5 kg a 2.0 kg), entonces en un período mínimo de uno a dos días la presión del gas producido excedía a la capacidad del transductor. En consecuencia, ya no se podía seguir tomando medidas por más días. Además, no era posible poner a secar un número suficiente de estas mismas muestras debido al volumen que ocupaban en el secador. Por el contrario, si la masa era muy pequeña (menor a 100 g), entonces el período de secado y fermentación disminuyó tanto, que el número de mediciones se redujo a dos o tres, lo cual llevaba a obtener curvas con pocos puntos experimentales. En este caso las tendencias de las curvas que se obtuvieran serían estadísticamente poco confiables. En la figura 14 puede apreciarse que a mayor masa corresponde una mayor altura en los cromatogramas, para un mismo período de fermentación.

En consecuencia, se determinó que la cantidad óptima de estiércol fresco a secar y fermentar era de 400 g. Para las muestras a fermentar en laguna anaeróbica la masa de estiércol fresco fue de 100 g, más 100 g de agua sin cloro. La reducción de 400 g a 100 g se debió a que la producción de gas en el manejo de excretas por laguna anaeróbica es máxima.

#### **II.14 pH de las muestras**

El pH de las muestras se obtuvo con un medidor de pH (CONDUCTRONIC PC18-3145) con resolución de 0.01. El medidor se calibró en cada serie de lecturas mediante soluciones tampón (MERCK) [fosfato] referidas a SRM de NIST, con valores pH de  $4.00 \pm 0.02$  (20°C) y  $7.00 \pm 0.02$  (20°C).

En cada una de las muestras a medir la proporción fue 1:5, ya que se tomaron 5.0 g de estiércol con humedad y 25.0 g de agua destilada (19.61  $\mu$ S). Previamente a cada medida, el electrodo era enjuagado con agua destilada y secado después con un pañuelo desechable de papel limpio. Posteriormente el electrodo se introducía a la mezcla homogénea de estiércol y agua para medir el pH respectivo. Las medidas se hicieron para cada período de secado y fermentación de las muestras. Cuando se simulaba el manejo de excretas por laguna anaeróbica, se midió únicamente el pH al inicio y al final de las corridas experimentales, debido a que los contenedores (fermentadores) permanecían cerrados todo el tiempo.

## **II.15 Análisis químico de las muestras**

Los alimentos son sustancias que luego de ser ingeridas por los animales, son digeridas, absorbidas y utilizadas para su mantenimiento y reproducción. No obstante, una parte de los nutrientes consumidos no son aprovechados, ya que son expulsados a través de las heces fecales y la orina. Estos nutrientes residuales en las excretas son utilizados por la bacterias acidofílicas para la *generación del metano*.

De acuerdo al “U.S. National Research Council” (NRC), los alimentos para consumo animal se clasifican como sigue:

### **A. Forrajes Secos y Alimentos Toscos**

- A.1 Henos.** Son aquellos forrajes que han sido secados al sol o deshidratados con calor. Pueden provenir de leguminosas y gramíneas.
- A.2 Pajas.** Es la parte aérea de las plantas después de la cosecha del grano o semilla. No contiene espigas, mazorca o panojas. Pueden provenir de leguminosas y gramíneas. En México se da el nombre de rastrojo a la paja de maíz.

A.3 Cáscaras. Son las cubiertas de los cereales, del algodón, del cacahuate, etc.

B. Forrajes frescos. Son aquellos forrajes que son consumidos frescos. Pueden ser de corte o por pastoreo, además de cultivados o nativos.

C. Ensilados. Son los productos obtenidos por la fermentación controlada, en un silo (recipiente), de un cultivo de alto contenido de humedad. Los ensilados pueden ser de gramíneas, leguminosas y otros cultivos.

D. Ingredientes Energéticos. Son aquellos ingredientes que contienen elevados porcentajes de almidón, carbohidratos solubles o grasas. Aquí se incluyen los granos de cereales y sus subproductos, los cuales pueden ser con alto o bajo contenido de fibra cruda, las grasas, las melasas, las frutas, las raíces y los tubérculos. En esta clase también se incluye cualquier producto con menos del 20% de proteína cruda y menos del 18% de fibra cruda.

E. Ingredientes proteicos. Son aquellos ingredientes que contienen 20% o más de proteína cruda, los cuales pueden ser de origen animal o vegetal. Las fuentes de nitrógeno no proteico se incluyen en esta clase, dado que los rumiantes las emplean para sintetizar proteína microbiana.

F. Minerales. Estos pueden ser de origen animal o propiamente de origen mineral.

G. Vitaminas. Son compuestos orgánicos que en pequeñas cantidades son incluidos en la dieta, al ser indispensables para las funciones vitales del animal.

H. Aditivos. Son aquellas sustancias que se adicionan a la dieta con propósitos particulares, como medicamentos, pigmentos, aromatizantes y hormonas.

Por otro lado, en general, los componentes presentes en el estiércol son:

- Agua
- Materia seca
  - Materia orgánica
    - Carbohidratos
    - Proteínas
    - Lípidos
    - Vitaminas
  - Materia inorgánica

-       Minerales

El análisis proximal es un conjunto de determinaciones de laboratorio, mediante el cual se evalúa en forma global cada grupo de nutrientes que contiene una muestra. Es decir, es un esquema de análisis químico mediante el que se determina la composición de una muestra en términos de sus principales grupos de nutrimentos, considerando para ello su calidad en función de grupos de compuestos con características fisico-químicas semejantes, pero con diferente valor nutritivo. Consta de las siguientes determinaciones: humedad, extracto etéreo, fibra cruda, extracto libre de nitrógeno, proteína cruda y cenizas. Este tipo de análisis no dice cuáles compuestos y cuánto de cada uno de ellos contiene cada determinación, sin embargo, es un buen indicador del porcentaje de nutrientes y de las energías digestible y metabolizable en el estiércol (Sosa, 1981; Tejeda, 1992).

La composición de cada “determinación” del análisis proximal es:

Nutriente	Determinación	Compuestos Químicos presentes
Agua	Humedad	Agua
Lípidos	Extracto Etéreo	Grasas, aceites, ceras, fosfátidos, cerebrósidos, lipoproteínas, pigmentos liposolubles, ácidos orgánicos liposolubles, esteroides y vitaminas liposolubles.
Carbohidratos	Fibra Cruda	Celulosa, hemicelulosas y lignina.
	Extracto libre de Nitrógeno	Monosacáridos, disacáridos, trisacáridos, pectinas, almidones, resinas, ácidos orgánicos hidrosolubles y vitaminas hidrosolubles.
Proteínas	Proteína Cruda	Proteínas, aminoácidos; compuestos orgánicos nitrogenados no proteicos como aminos, vitaminas del complejo B, ácidos nucleicos y glucósidos

nitrogenados; clorofilas; compuestos orgánicos nitrogenados como sales de amonio, hidróxido de amonio, amoniaco, nitratos y nitritos.

Minerales	Cenizas	Compuestos de Ca, K, Mg, Na, P, Fe, Mn, Cl, S, Cu, Co, Zn, Mo, Se y Si.
Vitaminas	No hay	Ninguna.

---

Para este estudio, el análisis químico proximal de las muestras fue realizado en el “Laboratorio de Análisis Químicos para Alimentos (SARH 0950693)”, del Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica, de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootécnia, de la UNAM.

## II.16 Potenciales máximos de producción y Factores de Conversión de Metano

El potencial de producción de metano, representado por  $B_0$  y expresado en  $m^3$  de  $CH_4$  por kg de sólidos volátiles (SV), se define como la capacidad máxima de producción de metano por cada tipo de excretas. Donde los SV se definen como la fracción de material orgánico, del total de sólidos en las excretas, que puede descomponerse por la acción de microorganismos, oxidarse y evaporarse a  $600^\circ C$ . El total de sólidos es definido como el material que permanece después de la evaporación del agua de las excretas a una temperatura de  $103^\circ C$  a  $105^\circ$ . Es decir, los SV corresponden al total de materia seca (MS) del estiércol menos la cantidad de cenizas (C), o sea,  $SV = MS - C$ .

Por otro lado, la ecuación (15) permite calcular la cantidad de metano, en mg, que emite la materia seca, en g, de una muestra fresca de estiércol. Ello equivale a calcular la cantidad de metano que existe en el volumen sin ocupar por la muestra en el contenedor. La determinación del volumen fue descrita en la sección II.10. Luego de las correspondientes transformaciones de unidades se tiene entonces la masa de  $CH_4$  para un volumen fijo, dada por:

$$\frac{M_{CH_4} [kg]}{V [m^3]} = \rho_{CH_4} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (17)$$

donde M es la masa, V el volumen y  $\rho$  la densidad.

Sabiendo que  $SV = MS - C$ , al introducir esta expresión en la ecuación (15) y efectuar las transformaciones de unidades respectivas se obtiene la cantidad de metano emitido, en kg, por kg de SV contenidos en la muestra de estiércol fresco, es decir:

$$\frac{\frac{mg \ CH_4}{100} \cdot g \ excretas \ frescas}{100} = \frac{10^{-6} \ kg \ CH_4}{10^{-3} \ kg \ SV} \quad (18)$$

Si se toma la densidad obtenida para las emisiones máximas (laguna anaeróbica) como un valor fijo de referencia, entonces al sustituir la masa de metano de la ecuación (18) en la ecuación (17), se tendrá el volumen correspondiente respecto a dicha densidad. Con ello se calculan las emisiones de metano en  $m^3 / kg \ SV$ , de modo que:

$$Emisiones \ CH_4 = \frac{\rho_{CH_4} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{\frac{M_{CH_4}}{SV [kg]}} = \frac{V_{CH_4} [m^3]}{SV [kg]} \quad (19)$$

Por otro lado, un factor de conversión de metano es la fracción de  $B_0$ , en porciento, que un tipo de excretas puede producir en determinado sistema de manejo de estiércol. Así entonces, a partir de los valores de  $B_0$  para cada sistema y función de la producción y temperatura se tendrán los factores de conversión correspondientes.

### III. DATOS EXPERIMENTALES

#### III.1 Datos de presión

La colecta de muestras, las corridas prueba y el desarrollo de los experimentos abarcaron poco más de un año, pues cubrieron el período de junio de 1998 a julio de 1999.

El registro directo de la presión del gas se realizó en una bitácora, en la cual se consignaron los lugares de procedencia de las muestras, la fecha de la corrida, las horas en que inició y terminó la fermentación y la temperatura del baño térmico. Para cada fermentador, marcados de la "A" a la "I", se registró la masa y el tipo de muestras contenidas, de acuerdo al sistema y función de la producción y clima de donde provenían tales muestras. Se registraron además la presiones iniciales y finales, en volts, para cada período de fermentación. Los datos de la bitácora se capturaron en Quattro Pro 6.01. A continuación se muestra el formato 1 con un ejemplo del registro efectuado.

Formato 1: Registro de la presión del gas						
Temperatura: 17°C			Inicio: 20 dic 98		Término: 22 dic 98	
Bote	Sistema	M [g]	P <sub>1</sub> [V]	Hora 1	P <sub>2</sub> [V]	Hora 2
A	ILT	325.2	3.200	13:07	3.405	18:45
...	...	...	...	...	...	...
I	EDP	332.4	3.200	13:25	3.297	19:03
Donde: M = masa, P <sub>1</sub> = Presión inicial, P <sub>2</sub> = Presión final, I = Intensivo, L = Leche, T = Templado, E = Extensivo y DP = Doble Propósito.						

Datos como los del formato 1 se registraron para todos los períodos sucesivos de fermentación y secado, correspondientes a cada corrida, de cada una de las temperaturas consideradas.

Para asegurar una buena representatividad estadística de los datos obtenidos, por cada sistema se fermentaban tres réplicas, así entonces los botes A, B y C contenían muestras homogéneas de un

mismo tipo; algo similar ocurrió con las dos ternas de botes restantes para otros tipos de muestras. Con los datos del formato 1 se efectuaron cálculos para obtener el cambio de masa de las muestras, las presiones en [mbar], los períodos de fermentación, los incrementos de presión, los cambios de presión al día y la presión acumulada en toda la corrida respectiva. El formato 2 presenta un ejemplo del registro efectuado.

Formato 2: Cambios de presión durante la fermentación de las muestras							
Sistema Intensivo Lechero. Temperatura de fermentación y secado: 12°C.							
Fermentación del ___ al ___	M [g]	$\Delta M$ [g]	Período [días]	Tiempo total [días]	$\Delta P$ [mbar]	$\Delta P/\text{día}$ [mbar/día]	P total [mbar]
14-18 feb 99	316.2	-83.9	1.94	5.76	37.12	19.15	864
...	...	...	...	...	...	...	...
26-28 feb 99	149.2	-250.9	1.96	14.91	7.57	3.86	979

Donde: M = Masa,  $\Delta$  = Incremento, P = Presión

Para cada temperatura de fermentación, datos como los del formato 2 se obtuvieron para cada clima, sistema y función de la producción. Así mismo, con los datos del formato 2 se establecieron algunas relaciones funcionales, como la pérdida de humedad de las muestras con el tiempo, el incremento diario de la presión en el tiempo acumulado y la variación de la presión total con el tiempo total.

### III.2 Datos cromatográficos

Simultáneamente al registro de la presión en cada bote o fermentador, eran extraídas muestras del gas producido e inyectados 5  $\mu\text{L}$  al cromatógrafo. Los cromatogramas obtenidos siempre presentaron sólo un pico, correspondiendo éste al metano contenido en las muestras de gas. El tiempo de retención de las muestras siempre fue de 2.8 min. A fin de asegurar una buena repetibilidad en las

medidas, para cada bote se obtuvieron dos cromatogramas, los cuales debían tener alturas muy similares. Si no era el caso, se detectaban y corregían las posibles fallas y se efectuaban las corridas necesarias hasta obtener la repetibilidad esperada.

En la misma hoja donde quedaron dibujados los cromatogramas de la corrida respectiva, paralelamente a cada cromatograma se anotaron datos de: bote, sistema, hora, rango, atenuación y altura del cromatograma. Posteriormente, estos datos fueron capturados también en Quattro Pro 6.01.

El formato respectivo así como un ejemplo se presentan en el formato 3.

Formato 3: Registro de datos cromatográficos					
Fermentación del 15 al 17 abr 1999.			Temperatura: 22°C		
Bote	Sistema	Hora	Rango	Atenuación	h [cm]
A	IL	14:09	1	8	11.4
A	IL	14:13	1	8	10.2
...	...	...	...	...	...
I	EDP	15:09	1	8	8.0
I	EDP	15:13	1	8	8.1
Donde: I = Intensivo, L = Leche, E = Extensivo, DP = Doble Propósito, h = Altura					

A partir de los datos del formato 3 se calcularon los valores promedio para cada sistema, en la inteligencia de que tres botes correspondían al mismo sistema. Así mismo, debido a que la sensibilidad en la atenuación correspondió a un valor mínimo de 4, se calcularon los valores de las alturas equivalentes, obtenidas experimentalmente para las atenuaciones mayores a 4. Con ello fue posible obtener valores promedio y normalizados a una sola atenuación. A cada uno de estos valores se les restó 1.6 cm de altura, que es el valor de respuesta del cromatógrafo para una concentración cero de metano. El formato 4 exhibe, con un ejemplo, el tipo de registro por sistema y función de

la producción.

Formato 4: Registro de valores promedio cromatográficos, con atenuación de 4					
Fermentación del 14 al 18 de feb 1999.			Temperatura: 22°C.		
Sistema	Masa	Hora	Rango	A'	h' [cm]
IL	195.8	14:15	1	4	18.5
...	...	...	...	...	...
EDP	196.6	15:15	1	4	14.6

Donde: I = Intensivo, L = Leche, E = Extensivo, DP = Doble Propósito, A' = Atenuación mínima 4, h' = Altura equivalente.

### III.3 Datos de producción de metano

Una vez que se tienen procesados los datos de presión y altura de los cromatogramas, es posible entonces calcular la concentración de metano, mediante la aplicación de la ecuación (14). En el formato 5 se presenta el registro utilizado.

Formato 5: Cálculo de concentraciones de metano						
Sistema Intensivo Carne			Temperatura: 22°C.			
Fermentación del ___ al ___	Período [días]	Tiempo total [días]	h' [cm]	h' total [cm]	C [%]	C total [%]
13-15 abr 99	1.90	3.60	75.0	119.6	2.23	4.81
...	...	...	...	...	...	...
19-21 abr 99	2.04	9.13	0.0	162.05	0.00	4.81

Donde: h' = Altura equivalente, C = Concentración

Los datos registrados en los formatos 2 y 5 se relacionaron a través de las columnas "tiempo", comunes a ambos formatos. Con base en esta relación se integró una base de datos, misma que al

aplicar la ecuación (12) fue posible entonces calcular la producción de gas en general y de metano en particular, para cada periodo de fermentación. Una vez que se tuvo la producción de metano, en mol, se transformó a gramos a través de la fórmula del peso molecular. Posteriormente, al aplicar la ecuación (15) a la producción total de metano, en mg, se obtuvo la producción de metano por unidad de masa de materia seca de estiércol. Los datos correspondientes se obtuvieron de forma semejante al que se presenta en el formato 6.

Formato 6: Cálculo de la producción de metano						
Sistema Intensivo Leche			Temperatura: 22°C.			
Tiempo [días]	gas [mol]	CH <sub>4</sub> [mol]	CH <sub>4</sub> total [mol]	CH <sub>4</sub> [mg]	CH <sub>4</sub> total [mg]	CH <sub>4</sub> / masa [mg/g]
3.57	4.15E-03	8.1E-05	1.0E-04	1.3E+00	1.7E+00	2.9E-02
...	...	...	...	...	...	...
9.07	8.89E-04	0.00	1.2E-04	0.00	1.9E+00	3.2E-02

Debido a que cada valor de tiempo incluyó la acumulación de los tiempos anteriores, entonces los datos registrados en cada columna corresponden a cantidades acumuladas para cada tiempo dado. De aquí que al tiempo máximo (último período de fermentación) correspondieron los valores máximos en cada columna.

Al aplicar la ecuación (16) al último valor de la columna "CH<sub>4</sub> / masa" (metano producido por gramo de materia seca de estiércol), asociado al último período de fermentación, se obtienen los factores de emisión de metano, en kg CH<sub>4</sub> / Cabeza · año, para cada sistema y función de la producción y cada temperatura. La tabla de valores obtenidos se proporciona en el capítulo de resultados.

### III.4 Datos de pH

Los datos del pH de las muestras fermentadas se compilaron primero en la bitácora y luego fueron capturados en Quattro Pro. Por cada período de fermentación de las muestras se registraron la fecha, la hora, el período respectivo, el tiempo acumulado durante los diversos períodos dentro de una corrida y el pH respectivo. El registro de estos datos se realizó de acuerdo al formato 7.

Formato 7: Registro del pH de las muestras de excretas				
Sistema Intensivo Carne, clima cálido			Temperatura: 22°C	
Fecha	Hora	Período [días]	Tiempo total [días]	pH
13 jul 99	13:28	0.00	0.00	7.24
...	...	...	...	...
30 jul 99	11:31	3.82	16.92	6.73

### III.5 Datos del análisis químico de las muestras

Los reportes del análisis químico proximal, enviados por el laboratorio responsable, tiene la presentación del formato 8.

En los reportes la columna "Determinación" incluyó: Materia Seca (MS) [%], Humedad (H) [%], Proteína Cruda (PC) [%], Extracto Etéreo (EE) [%], Cenizas [C] [%], Fibra Cruda (FC) [%], Extracto Libre de Nitrógeno (ELN) [%], Energía Digestible (ED) [kCal/kg] y Energía Metabolizable (EM) [kCal/kg]. Estos reportes se proporcionan para muestras clasificadas según el clima del lugar de procedencia, así como los sistemas y función de la producción del ganado.

Formato 8: Resultados del análisis químico proximal de las muestras			
Sistema Intensivo Carne		Clima: Frío	
Determinación	Base Húmeda	Base 90	Base 100
Materia Seca [%]	14.05	90.00	100.00
...	...	...	...
Energía Metabolizable [kCal/kg]	311.05	1993.01	2214.45

### III.6 Análisis de incertidumbres

De cada una de las variables involucradas en la serie de experimentos realizados, algunas de ellas fueron obtenidas directamente de las lecturas en los instrumentos de medición; otras de manera indirecta, a través de alguna relación matemática combinada con las medidas directas.

En relación al número de moles de gas producido, las variables medidas directamente fueron la presión del gas, el volumen no ocupado por el estiércol en los contenedores y la red de conductos, y la temperatura de fermentación. De estas variables, las presiones inicial y final en cada contenedor se medían sólo una vez, ya que durante cada medición una mínima parte de gas se perdía. Por tanto, si se medía varias veces la presión del mismo bote, siguiendo el proceso de abrir y cerrar las válvulas, entonces las lecturas descendían poco, pero constantemente. Y si las medidas se repetían únicamente abriendo y cerrando el circuito eléctrico, entonces las medidas se reproducían dentro de un rango de  $\pm 0.001$  V, que representa la resolución del voltímetro. Por ello se decidió tomar la primera lectura como representativa de la presión. Así entonces, la incertidumbre en la presión coincide con la resolución del instrumento, propagada luego de aplicar la ecuación (11), que es la que determina la relación funcional entre la presión y el voltaje.

En cuanto al volumen sin ocupar por las excretas, luego de varias mediciones del volumen de los botes, utilizando agua, primero vacíos y luego con excretas en su interior, se encontró una relación directa de la masa del estiércol con su volumen, similar a la del agua, es decir, un gramo de estiércol ocupa aproximadamente un  $\text{cm}^3$ . Ello debido, seguramente, a que la densidad del estiércol es muy próxima a la del agua. En este caso se consideró a la mínima escala, de la probeta utilizada para medir el volumen en los botes, como la incertidumbre absoluta. La incertidumbre asociada al volumen de la red de conductos fue la que resultó de la propagación respectiva, al considerar que el volumen se expresa mediante  $v = [\pi d^2/4] \cdot L$ ; donde  $v$  es el volumen de la red;  $d = (d_0 \pm \Delta d)$  es el diámetro de los conductos, con una resolución de 0.1 mm;  $L = (L_0 \pm \Delta L)$  es la longitud de la red de conductos, con la misma resolución de 0.1 mm. Por tanto, la incertidumbre del volumen total estuvo dada por  $\Delta V = \Delta v + \Delta v$ ; donde  $V$  es el volumen total,  $v$  es el volumen de cada bote y  $v$  es el volumen de la red de conductos.

La incertidumbre en la temperatura es de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , correspondiente al rango de funcionamiento del controlador de temperatura.

Así entonces, después de aplicar la ecuación (12), la incertidumbre en el número de moles de gas, por período de fermentación, es el resultado de la propagación de las incertidumbres absolutas de la presión, el volumen y la temperatura. La incertidumbre en los moles de gas total es la suma de las incertidumbres de cada período de fermentación.

Por otro lado, la concentración de metano es función de la altura de los cromatogramas. La altura es una medida no reproducible. Para un mismo sistema y función de la producción se consideraron tres botes o fermentadores, y de cada bote se obtuvieron dos cromatogramas; por lo que había en total 6 cromatogramas. El valor representativo fue el promedio de las 6 alturas, con una

incertidumbre dada por la desviación media.

En cuanto al tiempo, se tomó el promedio de los tiempos asociados a las medidas de la presión por un lado, y a las corridas cromatográficas por el otro. La incertidumbre en este caso correspondió a la desviación media.

Las incertidumbres en los resultados de la producción de mol gas / masa de excretas, mol CH<sub>4</sub> / masa de excretas, mg CH<sub>4</sub> / masa de excretas, mg CH<sub>4</sub> / g excretas frescas, fueron calculadas a través de la propagación de la incertidumbre en las ecuaciones (14), (15) y (16), al considerar la altura en los cromatogramas, la masa de las muestras, la presión registrada, la concentración de metano, así como la desviación media en el tiempo.

La incertidumbre absoluta en los datos del pH corresponde a la mitad de la mínima escala del potenciómetro utilizado, es decir, de 0.005 unidades.

Los valores de las incertidumbres obtenidas aparecen en las tablas de resultados respectivos.

## **IV. RESULTADOS**

### **IV.1 Efecto de la congelación de las muestras**

Cuando se colectaron las muestras de estiércol, éstas fueron depositadas en bolsas de polietileno y posteriormente cerradas. Luego, las bolsas con excretas se depositaron en contenedores de poliestireno expandido, cuyas paredes eran de 2 plg de espesor, con hielo en su interior.

En el curso de las corridas prueba, una fracción de las muestras se congelaron a  $-10^{\circ}\text{C}$  por un día. Al día siguiente se descongelaron y simultáneamente con muestras frescas y muestras preenfriadas en hielo, se pusieron a fermentar a  $21^{\circ}\text{C}$ . Se observó que al fermentarse por un día todo el conjunto de muestras, no presentaban diferencias notorias en la presión del gas producido y en la altura de los cromatogramas. Posteriormente se efectuaron el mismo tipo de corridas, pero utilizando entonces muestras que habían sido congeladas por dos o más días y luego descongeladas. En estos casos las diferencias en las emisiones respecto a las otras muestras fueron muy grandes, de modo que hasta después de varios días de fermentación se lograban niveles de producción de gas, semejantes a los del primer día de fermentación de las otras muestras. Esto significa que en las muestras precongeladas la población original de bacterias productoras de metano disminuye significativamente por la congelación.

Debido a que no hubo un control del número de bacterias al inicio de la fermentación, entonces no era conveniente utilizar tales muestras en el experimento, ya que los períodos de producción de gas no estarían bien determinados, además de ignorar la evolución real, en el tiempo, del crecimiento de las poblaciones. Si se conociera la población bacteriana al inicio del período de fermentación, sería posible entonces la inoculación controlada de bacterias y de este modo tener una población de bacterias semejante a la existente en las muestras frescas. Debido a que para este estudio no se tenía

la metodología que garantizara la inoculación adecuada, sólo se utilizaron muestras frescas.

## IV.2 Análisis químico proximal

Los alimentos consumidos por el ganado en las regiones consideradas en este estudio fueron:

Clasificación	Alimento
ILD	Maíz molido, paja de avena molida, salvado, pasta de coco, alimento balanceado y sales minerales.
S-ILD	Rastrojo de maíz, suplemento balanceado y pastos inducidos.
ICaD	Maíz molido, polinaza, zacate molido y harina.
EdPD	Gramina nativa, rastrojo seco de maíz, paja de trigo y paja de avena.
ILC	Cascarilla de cítricos, semilla de algodón, silo de maíz, melaza, alfalfa fresca, alfalfa achicalada, pastos inducidos, alimento balanceado de granos y sales minerales.
ICaC	Maíz molido, pasta de soya, cascarilla de cítricos, sorgo, silo de maíz, melaza y pollinaza, forraje de avena, forraje de sorgo, rastrojo de cebada, silo de sorgo, alfalfa fresca y triticale.
S-ILC	Pasto inducido, gramina nativa verde, silo de maíz, rastrojo de maíz molido, paja de avena y suplemento balanceado.
EdPC	Gramina nativa, rastrojo de maíz, paja de cebada y paja de avena.
ILA	Sorgo molido, maíz molido, caña picada, limolina, alimento balanceado y sales minerales.
S-ILA	Gramina nativa, rastrojo de avena, galleta, sema, caña picada y sales minerales.
ICaA	Cáscara de cacahuate, maíz molido, melaza, pollinaza, sorgo molido, harina de pan, rastrojo picado y sales minerales.
EdPA	Gramina nativa y rastrojo de maíz

S-ICaA Pollinaza, sorgo molido, limolina, caña picada, y rastrojo de maíz.

Donde: I = Intensivo; S-I = Semi-intensivo; E = Extensivo; L = Leche; Ca = Carne; dP = Doble propósito; D = Frío; C = Templado; A = Cálido.

---

Las siglas "A" para climas cálidos, "C" para climas templados y "D" para climas fríos fueron adoptadas siguiendo la clasificación climática de Köeppen.

Se observa, de acuerdo a la descripción anterior, que en general dentro de cada sistema de producción, el alimento difiere de una región a otra, en función del clima y de la producción agrícola local. La calidad es menor en los sistemas extensivos (EdP), mejora en los semi-intensivos (S-IL) y es de mayor calidad en los sistemas intensivos (IL e ICa).

En relación al contenido de nutrientes en las excretas, la tabla 2 muestra los resultados obtenidos de los análisis químicos respectivos. En dicha tabla, en el renglón de promedios, luego de tomar como base el contenido de materia seca, se tienen las siguientes proporciones:

---

Determinación	%	Observaciones
Proteína Cruda	12.94	Casi la octava parte de las excretas son proteínas.
Extracto Etéreo	2.07	Prácticamente no hay grasas y ácidos orgánicos liposolubles en el estiércol de bovinos.
Cenizas	20.86	Poco más de la quinta parte de las excretas son minerales.
Fibra Cruda	25.41	La cuarta parte son carbohidratos en forma de celulosa, hemicelulosa y lignina.
Extracto Libre de Nitrógeno	38.72.	Casi el 40% de las excretas se componen de carbohidratos en forma de azúcares, pectinas y almidones, entre otros compuestos.

---

Al revisar los valores por columna en la misma tabla, se nota que la Materia Seca (MS) para el sistema Intensivo productor de Carne en clima Cálido (ICaA), es casi 40% mayor al promedio de los demás sistemas. Lo cual indica que estos animales consumen alimentos más secos que el resto de los animales.

En la columna de Proteína Cruda (PC) se observa que es el mismo sistema (ICaA) el que sobrepasa a los demás, ahora con el 108%. Esto se debe, seguramente, a que la dieta de los animales productores de carne se compone principalmente de granos, los cuales tienen un porcentaje de proteínas mayor que el resto de los alimentos.

En relación al Extracto Etéreo (EE), nuevamente las excretas del sistema ICaA tienen más grasas y aceites, en un 98%, que las demás excretas.

En la determinación "Cenizas" (c), es el estiércol del sistema de ganado en pastoreo (EdPC) el que tiene un 68% más minerales que los restantes. La razón de este excedente es que los animales al arrancar el pasto del suelo para consumirlo, algo de tierra es ingerida durante el proceso.

En cuanto a la Fibra Cruda (FC), son otra vez las excretas del sistema ICaA las que tienen una mayor cantidad de estos nutrientes. Ello debido a que buena parte de los granos que consumen los animales, no son triturados por los productores a tamaños tales que puedan digerirse; además de haber una preponderancia de este tipo de alimento sobre los forrajes, de modo que no todo el grano ingerido es debidamente digerido. Esta es la razón para que también las cantidades de Extracto Libre de Nitrógeno (ELN), es decir, azúcares y almidones; así como Energía Digestible (ED) y Energía metabolizable (EM), presentes en las excretas, sean mayores en este sistema, con el 41% para el ELN, el 73% para la ED y el 73% también para la EM; todo ello respecto al promedio de los valores, de las mismas determinaciones, de los demás sistemas de producción.

Se observa asimismo que para las determinaciones de MS, PC, EE, FC y ELN (figura 15), sus valores son muy cercanos entre si para todos los sistemas de producción, salvo para el ICaA.

En cuanto a las determinaciones de ED y EM (figura 16); se observa que para climas cálidos (A) los valores son notablemente mayores a los valores obtenidos para climas templados (C).

Estos análisis muestran además, de acuerdo a la tabla 2, que en promedio para todos los sistemas de producción, a excepción del contenido de cenizas, los productos obtenidos son menores para climas templados (C) en comparación a los climas cálidos (A).

### **IV.3 Modelación matemática del secado de las muestras**

El secado de muestras correspondió a los sistemas de producción intensivo, semi-intensivo y extensivo. La figura 17 presenta la variación de la masa con el tiempo de secado a 21 °C, en la inteligencia de que el comportamiento para todas las temperaturas fue similar. En dicha figura se observa un descenso exponencial de la masa en los tres sistemas. La tendencia presentada señala que la pérdida de humedad de las muestras es prácticamente la misma para los tres sistemas, de modo que se puede considerar una tendencia promedio como representativa de todas. El modelo matemático de esta tendencia está dado por:

$$M = 392.06e^{-0.155 \cdot t} \quad (20)$$

donde:

M = masa, en g

t = tiempo de secado, en días.

El modelo anterior indica que para llegar a una masa de 61.3 g, que sería la masa promedio de materia seca (de acuerdo al análisis químico proximal), se requiere aproximadamente de 12 días, que

es lo que realmente se observa. Un comportamiento exponencial negativo, muy similar al aquí descrito, ocurre para todos los sistemas de producción y todas las temperaturas consideradas.

#### **IV.4 Variación de la presión y las concentraciones de metano**

La presión es el parámetro que determina la cantidad de gas producido. Su registro se llevó a cabo durante cada periodo de fermentación, para las escretas de cada sistema de producción y cada temperatura. Se observó que las tendencias en la presión generada al día, en todos los sistemas y temperaturas fueron similares, pues en los primeros periodos de fermentación, el incremento de la presión fue mayor respecto al resto de los periodos. Un ejemplo se proporciona en la figura 18. En ésta se observa que a 21 °C, para los sistemas Intensivo Leche (IL), Semi-Intensivo de Doble Propósito (S-IdP) y Extensivo de Doble Propósito (EdP), en el segundo periodo se alcanza la mayor tasa de producción de gas (30 a 42 mbar/día). A partir de entonces hay un descenso continuo, hasta llegar a un mínimo entre el séptimo y octavo días de fermentación (6 a 12 mbar/día). Al considerar los tres sistemas de producción y todos los periodos, el promedio diario en la presión del gas es de 19 mbar/día, mientras que para los dos últimos es de 9 mbar/día. Es notorio entonces que no se puede aceptar que el gas generado durante el séptimo día represente al gas producido durante cada uno de los días previos a éste último, ya que esto llevaría a una subestimación de las emisiones totales de gas.

La fracción de metano contenido en el gas producido se determina al conocer la concentración respectiva. La variación al día de la concentración como función del tiempo se ejemplifica en la figura 19. En esta figura se representan las tendencias registradas para las corridas a 21 °C y los mismos tres sistemas descritos antes en esta misma sección. Se observa además un comportamiento

similar al de la figura 18; es decir, en los dos primeros períodos existe una mayor concentración, siendo el mayor de 1%. En adelante las concentraciones disminuyen en forma continua hasta llegar a cero a los 13 días de fermentación. Nuevamente se nota que la concentración alcanzada en el séptimo día (0.14 %/día) no puede representar las emisiones promedio del total de períodos de fermentación (0.33 %/día).

#### **IV.5 Emisiones de metano como función del tiempo y la humedad**

Las emisiones de metano por cada muestra fermentada en cada período, dependió del tiempo previo que duró secándose dicha muestra y de la humedad que ésta retuvo en ese tiempo; ya que además de perder agua, la muestra se fermentó mientras se secaba, de modo que al ser llevada al contenedor para su fermentación anaeróbica, la muestra ya presentaba cierto grado de fermentación.

El comportamiento típico de las emisiones diarias de metano como función del tiempo de fermentación, a 12 °C, se proporciona en la figura 20. En dicha figura se percibe que para los sistemas intensivos y semi-intensivos lecheros (ILy S-IL) las emisiones son bajas durante los primeros dos períodos y en el tercero (7.6 días), las emisiones son altas; observándose en ese caso un máximo muy pronunciado para el sistema IL. Es importante mencionar que el alimento de los animales en este sistema tiene una calidad equivalente a la del ganado lechero en clima templado, el cual es muy superior al alimento de los otros sistemas en climas fríos.

Debe señalarse que los máximos en la generación de metano respecto al tiempo, dependen de la temperatura de fermentación, pues mientras menor es la temperatura, el máximo ocurre para un tiempo mayor de fermentación. Esto se debe, seguramente, a que la población bacteriana inhibe su crecimiento a bajas temperaturas.

Uno de los objetivos de este estudio fue determinar el efecto del contenido de humedad de las muestras en la producción de  $\text{CH}_4$ . Las emisiones diarias de metano como función de la humedad, a 12 °C, se exhiben en la figura 21. En ésta se ve que al descender la humedad en un 25% aproximadamente, las emisiones al día también se reducen. Continúan bajando hasta el 62.1% de contenido de humedad para los sistemas Extensivo en clima frío (EdP) e Intensivo de Engorda en el mismo clima (ICa); repuntando ligeramente para una humedad del 53.4% para el ganado de engorda, luego de lo cual las emisiones descienden continua y paralelamente al descenso de la humedad. Un comportamiento muy diferente se presenta con las excretas del ganado lechero (IL), ya que las emisiones son muy superiores cuando tienen una humedad de 62.1% (0.31 mg/día). Este máximo ocurre a los 7.6 días de fermentación, como era de esperarse según la figura 20. Ello indica que aunque la disponibilidad de agua baja, el número de bacterias productoras de metano se incrementa al máximo, trayendo como consecuencia que los nutrientes aprovechables por las bacterias se reduzcan significativamente. A partir de entonces la pérdida de humedad es el factor que influye sobre la disminución en las emisiones.

Considerando que a cada sistema de producción está asociado un tipo de alimentación animal, entonces, en una primera etapa es el tipo de nutrientes disponibles en las excretas el factor dominante, seguido de una segunda etapa, dominada por el descenso de la humedad como el factor de mayor peso en las emisiones de  $\text{CH}_4$ . Comportamientos similares se advierten en todos los sistemas y todas las temperaturas de secado y fermentación; notándose que el tiempo de secado se acorta conforme aumenta la temperatura.

#### **IV.6 Efecto del pH en las emisiones de metano**

En este estudio se encontró que en general el pH de las excretas está en función del tipo de alimento consumido por los animales, ya que las gráficas de la evolución del pH en el tiempo cambian de un sistema y función de la producción a otro. La figura 22 presenta la variación del pH durante el tiempo de secado y fermentación de excretas de bovino a 20 °C. En dicha figura, para todos los sistemas considerados se notan tendencias descendentes primero, hasta alcanzar valores mínimos, seguidas de ascensos constantes. Sin embargo, estas tendencias están defasadas unas de otras, es decir, el tiempo transcurrido para alcanzar el valor mínimo de pH varía de un sistema y función a otro.

Es posible que durante la formación de CO<sub>2</sub> se dé un descenso del pH, con una baja concentración de metano. Pudo ocurrir por otro lado, que la acidez de las excretas se deba a la proliferación de bacterias acidofílicas, correspondiendo ello a una buena concentración de metano sin que implique una alta presión. El que se de una u otra situación puede depender del tipo de nutrientes en las excretas.

Durante el ascenso en las curvas de pH, luego de varios días de fermentación, la población microbiana seguramente se reduce de forma constante y en consecuencia la producción de metano baja en esa misma proporción.

En la figura 22, las curvas correspondientes a engorda intensiva en climas cálidos (ICaA) el pH inicial es de 7.24, luego de 9.18 días desciende a 6.04 (-0.13/día). Para ganado de engorda en climas templados (ICaC), el pH inicial es de 6.66 y se reduce a 5.80 a los 9.18 días (-0.09/día). Posteriormente hay un ascenso significativo en los ocho días siguientes, siendo más pronunciado en el sistema ICaA. Son precisamente estos dos sistemas los que menos metano producen en relación

a los demás sistemas.

El sistema semi-intensivo lechero también tiene un cambio importante de pH, ya que inicia en 7.28 y luego de 13.07 días es de 6.26, lo que equivale a un descenso de -0.08/día, esto es, el pH no baja tan rápido como en ICaA o ICaC. En este sistema la producción de metano es ligeramente superior a la de los mismos ICaA e ICaC.

El pH de las excretas del ganado de engorda intensiva con alimentación “especial” (ICaCE) inició en 7.75 para luego de 13.07 días bajar a 7.33, lo cual corresponde a un cambio de -0.03/día. Así mismo, el pH inicial del estiércol de ganado lechero intensivo en climas templados (ILC) es de 7.86 y a los 4.08 días es de 7.42, lo que equivale a una disminución de -0.11/día. En estos dos sistemas (ICaCE) y (ILC) se tienen excretas siempre por arriba de 7 en el pH y presentan cambios mínimos de pH. Son justamente estos sistemas los que más metano producen.

El pH del sistema extensivo (EdP) presenta cambios mínimos y una posición media en relación a los máximos y mínimos de los otros sistemas, siendo la producción de metano similar al sistema semi-intensivo lechero.

Así entonces, cuando las muestras son secadas y fermentadas puede observarse que si el valor inicial del pH es bajo y desciende además rápidamente, entonces la generación de  $\text{CH}_4$  se inhibe notablemente. Por el contrario, si el pH inicial es alto en relación a los otros sistemas y no sufre cambios de valor importantes, entonces la *generación de metano se maximiza*.

Para las muestras fermentadas en laguna anaeróbica a 35 °C, el pH fue medido al inicio y al final de las corridas. La figura 23 muestra cómo es la variación del pH con el tiempo para diferentes sistemas y funciones de la producción y climas. En esta figura se observa que siempre el pH baja.

Los cambios de pH al día están dados por:

Sistema	ICaA	S-ILC	ICaC	ICaCE	ILC	EdP
$\Delta(\text{pH})$	0.09	0.11	0.07	0.12	0.09	0.10

Donde se aprecia que no hay un patrón regular relacionado con la calidad de nutrientes presentes en las excretas. Por otro lado, para este tipo de fermentación las emisiones del sistema ILC son muy superiores a cualesquiera de los otros sistemas fermentados de igual forma, los cuales a su vez tienen emisiones muy cercanas entre sí. Esto se puede verificar en los resultados de emisiones para laguna anaeróbica de este trabajo. Así pues, no hay una relación clara entre la disminución total del pH de las excretas de cada sistema de producción y las emisiones totales de metano por fermentación en laguna anaeróbica. De aquí la posibilidad de que existan diferentes etapas durante la fermentación en laguna anaeróbica, en las cuales ocurran reacciones entre los diferentes productos, tales que sus presiones parciales cambien en cada etapa. La proporción de las presiones parciales seguramente difiere de un sistema de producción a otro para cada clima considerado.

Al comparar los promedios obtenidos desde el pH inicial hasta su valor más bajo, se observa una disminución de -0.73 cuando hay secado y -1.67 para laguna anaeróbica. Esto corresponde a un descenso del pH de 128.8% mayor para laguna anaeróbica respecto al descenso para las muestras con secado.

#### **IV.7 Factores de emisión**

Los factores de emisión de metano obtenidos corresponden a 12°C, 17°C, 21°C, 22°C, 27°C y 35°C. Los resultados en las emisiones de metano se presentan en tablas; en ellas aparecen los

períodos de secado y fermentación en días, las emisiones, en mg CH<sub>4</sub>, para muestras de 400 g, y las emisiones por unidad de masa de materia seca de estiércol, en mg CH<sub>4</sub> / g MS. Aparecen también las emisiones por fermentación en laguna anaeróbica. Cada valor reportado es acompañado de su incertidumbre.

Luego de realizar diversas observaciones relacionadas con la masa total de excretas producidas por un animal al día, se consideró que las producciones promedio de estiércol por animal están dadas como sigue:

*Producción diaria de excretas de ganado bovino, por sistema y función de la producción*

Sistema y función	Producción de excretas [kg / día]
Lechero estabulado (IL)	35
Engorda en corral (ICa)	25
Lechero semi-estabulado (S-IL)	20
Doble propósito en pastoreo (EdP)	12
Semi-intensivo de engorda en clima cálido (S-ICa)	30

Al sustituir estos valores en la ecuación (16) y aplicarla al valor obtenido en el último período de fermentación de las emisiones por gramo de materia seca de estiércol, se obtuvieron los factores de emisión para cada sistema y función de la producción en cada clima.

#### **IV.7.1 Factores de emisión en climas fríos**

Se consideró, al igual que en la metodología del IPCC (1996), que un clima es frío o semifrío cuando su temperatura media anual oscila entre los 8°C y los 15°C. La temperatura de fermentación y secado fue de 12°C. Para los Estados del país considerados en este estudio, el clima semifrío se

encuentra en el occidente del Estado de México, en los límites con el Estado de Michoacán, en la región mazahua comprendida por los municipios de Atlacomulco, San Felipe del Progreso, Villa Victoria y Angangueo; lugares estos donde es importante la producción ganadera.

Los sistemas de producción simulados fueron: Intensivo Leche (IL), Intensivo Leche en Laguna Anaeróbica (IL-LA), Semi-Intensivo Leche (S-IL), Intensivo Carne (ICa) y Extensivo de Doble Propósito (EdP).

La tabla 3 presenta las emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado (ILD), secadas y fermentadas a 12 °C. Al graficar las emisiones ( $\text{CH}_4$  [mg]) contra el tiempo promedio, de los datos contenidos en las tablas 3 a 6 (figura 24) se obtiene la tendencia en la producción de metano por muestra fermentada para una temperatura de 12 °C. En esta figura se presentan las tendencias en las emisiones para los sistemas: IL, S-IL, ICa, EdP. En relación al sistema ILD se observa que en el período de 5.6 a 7.3 días se alcanza la máxima producción de metano y del noveno día en adelante las emisiones prácticamente se anulan. Por otra lado, en la tabla 3 se señala que las emisiones totales de las muestras son de 0.56 mg, obtenidas en 14.73 días de fermentación. También indica que las máximas emisiones por unidad de masa son de  $9.6 \times 10^{-3}$  mg  $\text{CH}_4$  / g MS. Al considerar una producción de estiércol de 35 kg/día, se obtiene que el factor de emisión (F.E.) en climas fríos (F) está dado por:

$$\text{F.E.}_{(\text{ILD-12}^\circ\text{C})} = (1.78 \times 10^{-2} \pm 1.94\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Las emisiones del ganado lechero en producción semi-intensiva (S-ILD), a 12 °C se exhiben en la tabla 4 y la misma figura 24. En dicha figura se distingue que es el mismo período en el que los sistemas intensivo y semi-intensivo lechero alcanzan la máxima producción, sin embargo, en el

segundo el incremento en la producción durante ese período es menor que el primero en 8.6 veces. Al comparar las tablas 3 y 4 se nota que la producción total de metano por unidad de masa en la 3 es 3.4 veces mayor que en la 4. La tabla 4 reporta una producción de  $2.8 \times 10^{-3}$  mg de metano por cada gramo de MS. Con 20 kg/día de excretas por animal se llega a un factor de emisión de:

$$F.E._{(S-ILD-12^{\circ}C)} = (3.01 \times 10^{-3} \pm 5.69\%) \text{ kg CH}_4 / \text{Cabeza} \cdot \text{año}$$

La figura 24 indica que de los sistemas simulados con excretas del ganado de engorda en producción intensiva (ICaD) y fermentados a  $12^{\circ}C$  es el penúltimo en producción de metano. Según la tabla 5, produce  $1.3 \times 10^{-3}$  mg de metano por g de materia seca. Como el estiércol generado por cabeza es de 25 kg/día, el factor de emisión está dado por:

$$F.E._{(ICaD-12^{\circ}C)} = (8.96 \times 10^{-4} \pm 11.38\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

El sistema de ganado en pastoreo de doble propósito (EdPD), a  $12^{\circ}C$  es el que menos produce, como puede comprobarse en la misma figura 24. De acuerdo a la tabla 6, la producción de metano por gramo de MS es de  $2.1 \times 10^{-4}$  mg, cantidad 45.8 veces menor que lo producido por el ganado lechero estabulado. Al tomar en cuenta que en este sistema los animales producen 12 kg/día de excretas por cabeza, el factor de emisión es de:

$$F.E._{(EdPD-12^{\circ}C)} = (1.53 \times 10^{-4} \pm 0.61\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

#### **IV.7.2 Factores de emisión en climas templados**

Se considera que un clima es templado (C) cuando su temperatura media anual oscila entre los  $16^{\circ}C$  y los  $23^{\circ}C$ . En el centro de México este clima se encuentra en el Distrito Federal, con una

temperatura aproximada de 16°C; en el centro, norte y oriente del Estado de México, con temperaturas que oscilan entre 18°C y 22°C; en el Estado de Tlaxcala, con temperaturas que van de los 15°C a los 18°C; en el centro y sur del Estado de Hidalgo, con temperaturas de 16°C a 22°C; y en el centro y sur del Estado de Querétaro, con temperaturas entre 16°C y 23°C. Las muestras fueron secadas y fermentadas a 17°C, 21°C y 22°C; donde los 21°C correspondieron a la época de lluvias. Para climas templados los sistemas de producción simulados fueron: Intensivo Leche (IL), Intensivo Carne (ICa), Semi-Intensivo Leche (S-IL) y Extensivo de Doble Propósito (EdP).

Las tendencias de las emisiones en el tiempo, para una temperatura de 17 °C (figura 25), se obtuvieron luego de graficar las emisiones de CH<sub>4</sub> contra el tiempo promedio de fermentación de las excretas, de los datos considerados en las tablas 7 a 10.

Para excretas del ganado bovino lechero estabulado (ILC), secadas y fermentadas a 17 °C, en la figura 25 se observa que es en el primer período de fermentación donde se produce la mayor cantidad de metano. En la tabla 7 se consigna que la producción máxima de metano por gramo de MS de estiércol es de  $1.3 \times 10^{-2}$  mg. Con 35 kg/día de estiércol por animal se tiene un factor de emisión de:

$$F.E._{(ILC-17^{\circ}C)} = (2.37 \times 10^{-2} \pm 3.75\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

En cuanto a los desechos del ganado de engorda en climas templados (ICaC), a 17 °C, la figura 25 indica que es el sistema con mayores emisiones (2.7 mg), para la masa fermentada. En el tercer período de fermentación (5.44 a 8.99 días) se alcanza la máxima producción de metano y de ahí en adelante las emisiones disminuyen drásticamente. De acuerdo a la tabla 8, la producción total es de  $4.4 \times 10^{-2}$  mg CH<sub>4</sub> / g MS. Al aplicar una producción de estiércol de 25 kg/día por cabeza, se calcula un factor de emisión de:

$$F.E._{(CaC-17^{\circ}C)} = (6.22 \times 10^{-2} \pm 15.67\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

En la figura 25, para el ganado lechero semi-estabulado (S-ILC) se observa una producción constante en el período de 1.67 a 8.99 días, a partir de entonces las emisiones prácticamente se anulan. Es el segundo sistema en importancia en las emisiones, con una producción de 2.1 mg CH<sub>4</sub>, para la muestra fermentada. La tabla 9 reporta una producción de 3.6 x 10<sup>-2</sup> mg de metano por cada gramo de MS. Si cada animal genera 20 kg/día de estiércol, entonces el factor de emisión es de:

$$F.E._{(S-ILC-17^{\circ}C)} = (3.85 \times 10^{-2} \pm 6.81\%) \text{ kg CH}_4 / \text{Cabeza} \cdot \text{año}$$

Las muestras del ganado en pastoreo de doble propósito (EdPC), a 17°C son las que menos producen (3.6 x 10<sup>-1</sup> mg), como puede comprobarse en la figura 25. De acuerdo a la tabla 10, la producción de metano por gramo de MS es de 5.4 x 10<sup>-3</sup> mg. Con 12 kg/día de excretas por cabeza, entonces el factor de emisión es:

$$F.E._{(EdPC-17^{\circ}C)} = (3.44 \times 10^{-3} \pm 15.39\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Los sistemas de producción simulados a 21°C fueron: Intensivo Leche (IL), Semi-Intensivo Leche (S-IL), y Extensivo de Doble Propósito (EdP). Los resultados para esta temperatura corresponden a la época de lluvias. Los perfiles de las emisiones a 21°C fueron obtenidos al promediar los tiempos de fermentación consignados en las tablas 11 a 13 y graficar contra las emisiones de CH<sub>4</sub> [mg] por muestra de 400 g, para cada sistema de producción considerado.

Para el ganado bovino lechero estabulado (ILC), en la figura 26 se observa que es el sistema que menos produce (2.1 x 10<sup>-2</sup> mg) para las muestras fermentadas. En la tabla 11 se consigna que la

producción de metano por gramo de MS de estiércol es de  $1.0 \times 10^{-2}$  mg. Considerando que en este sistema se producen 35 kg de estiércol por animal al día, entonces el factor de emisión será:

$$F.E._{(ILC-21^{\circ}C)} = (1.86 \times 10^{-2} \pm 2.36\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Para el ganado lechero en producción semi-intensiva, a  $21^{\circ}C$ , en la figura 26 se observa una producción mayor en el primer período, a partir de entonces las emisiones descienden constantemente. Es el segundo sistema en importancia en las emisiones, con una producción de  $8.5 \times 10^{-1}$  mg  $CH_4$ , para las muestras fermentadas.

La tabla 12 reporta una producción de  $1.5 \times 10^{-2}$  mg de metano por cada gramo de MS. Si se considera que en los sistemas semi-intensivo se generan 20 kg de estiércol por animal al día, con ello el factor de emisión es de:

$$F.E._{(S-ILC-21^{\circ}C)} = (1.56 \times 10^{-2} \pm 1.53\%) \text{ kg CH}_4 / \text{Cabeza} \cdot \text{año}$$

En relación a la temperatura de  $21^{\circ}C$ , las muestras del ganado en pastoreo de doble propósito (EdPC) son las que más producen ( $9.3 \times 10^{-1}$  mg), como puede verse en la figura 26. Sin embargo, de acuerdo a la tabla 13, la producción de metano por gramo de MS es de  $1.4 \times 10^{-2}$  mg. Debido a que el ganado en pastoreo genera diariamente del orden de 12 kg de estiércol por animal, entonces el factor de emisión es:

$$F.E._{(EdPC-21^{\circ}C)} = (1.02 \times 10^{-2} \pm 1.40\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Los factores de emisión en clima templado a  $22^{\circ}C$  corresponden a la simulación de los sistemas de producción: Intensivo Leche (IL), Intensivo Carne (ICa), Semi-Intensivo Leche (S-IL) y Extensivo

Doble Propósito (EdP). Para percibir las diferencias en las emisiones a esta temperatura se consideraron los valores de las emisiones de metano por muestra fermentada contra el tiempo promedio de fermentación, de las tablas 14 a 17. Con ello se conformó la figura 27.

Para el ganado bovino lechero estabulado, en la figura 27 se observa que es el sistema con el segundo lugar. Produce 1.9 mg del total de muestras fermentadas. En la tabla 14 se consigna que la producción de metano por gramo de MS de estiércol es de  $3.2 \times 10^{-2}$  mg. Considerando que en este sistema se producen 35 kg de estiércol por animal al día, entonces el factor de emisión será:

$$F.E._{(ILC-22^{\circ}C)} = (5.92 \times 10^{-2} \pm 3.83\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

En cuanto a las emisiones del ganado de engorda en corral (ICaC), la figura 27 indica que es el sistema con mayores emisiones (8.5 mg), para la masa fermentada. Es en el segundo período de fermentación (1.70 a 3.60 días) en que se alcanza la máxima producción de metano y de ahí en adelante las emisiones disminuyen constantemente. De acuerdo a la tabla 15, la producción total es de  $1.4 \times 10^{-1}$  mg CH<sub>4</sub> / g MS. Al considerar que cada animal defeca 25 kg de estiércol al día, el factor de emisión está dado por:

$$F.E._{(ICaC-22^{\circ}C)} = (1.94 \times 10^{-1} \pm 5.77\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Las emisiones del ganado lechero semi-estabulado, representadas en la figura 27, señalan una producción mayor en el segundo período, a partir de entonces las emisiones descienden constantemente. Es el tercer sistema en importancia en las emisiones, con una producción de 1.7 mg CH<sub>4</sub>, para las muestras fermentadas. La tabla 16 reporta una producción de  $2.9 \times 10^{-2}$  mg de metano por cada gramo de MS. Si se considera que en los sistemas semi-intensivo se generan 20 kg de

estiércol por animal al día, con ello el factor de emisión es de:

$$F.E._{(S-ILC-22^{\circ}C)} = (3.09 \times 10^{-2} \pm 8.97\%) \text{ kg CH}_4 / \text{Cabeza} \cdot \text{año}$$

Las muestras del ganado en pastoreo generan un perfil en el que se nota que son las que menos producen ( $7.7 \times 10^{-1}$  mg), como puede comprobarse en la figura 27. De acuerdo a la tabla 17, la producción de metano por gramo de MS es de  $1.2 \times 10^{-2}$  mg. Debido a que el ganado en pastoreo genera diariamente del orden de 12 kg de estiércol por animal, entonces el factor de emisión es:

$$F.E._{(EdPC-22^{\circ}C)} = (8.40 \times 10^{-3} \pm 1.15\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

#### **IV.7.3 Factores de emisión en climas cálidos**

Se considera que los climas son semicálidos y cálidos cuando su temperatura media anual es mayor a los 24°C. En el país la temperatura media anual para los climas cálidos es de 27°C. En el centro de México este clima se encuentra principalmente en el Centro, Suroeste, Sureste y Sur del Estado de Morelos, con temperaturas que oscilan entre los 25°C y 35°C. Las muestras fueron secadas y fermentadas a 27°C y 35°C.

Para la temperatura de secado y fermentación de 27°C, los sistemas de producción simulados fueron: Extensivo de Doble Propósito (EdP), Semi-Intensivo Leche (S-IL), Intensivo Carne con muestras provenientes de lugares con climas cálidos (ICaA) y muestras de climas templados (ICaC) e Intensivo Leche con muestras de climas cálidos (ILA) y climas templados (ILC).

La intención de fermentar muestras de climas templados y climas cálidos a 27°C, fue para percibir la diferencia en las emisiones por efecto de la temperatura y de la alimentación, si era el caso.

Las gráficas de todos los sistemas a esta temperatura se presentan en la figura 28. Tales gráficas se

obtuvieron de los valores de tiempo promedio y emisiones de metano por muestra, consignados en las tablas 18 a 23.

De acuerdo a la figura 28, las muestras del ganado en pastoreo (EdP) ocupan el tercer lugar de importancia en la producción ( $3.4 \text{ mg CH}_4$ ). Así mismo, según la tabla 18, la producción de metano por gramo de MS es de  $5.4 \times 10^{-2} \text{ mg}$ . Debido a que el ganado en pastoreo genera diariamente del orden de 12 kg de estiércol por animal, entonces el factor de emisión es:

$$\text{F.E.}_{(\text{EdPA-27}^\circ\text{C})} = (3.77 \times 10^{-2} \pm 1.48\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Para las excretas del ganado lechero semi-estabulado (S-IL) se percibe una producción mayor en el primer período, a partir de entonces las emisiones descienden constantemente. Es el segundo sistema en importancia en las emisiones, con una producción de  $6.1 \text{ mg CH}_4$ , para las muestras fermentadas. La tabla 19 reporta una producción de  $8.7 \times 10^{-2} \text{ mg}$  de metano por cada gramo de MS. Si se considera que en los sistemas semi-intensivo se generan 20 kg de estiércol por animal al día, con ello el factor de emisión es de:

$$\text{F.E.}_{(\text{S-ILA-27}^\circ\text{C})} = (1.11 \times 10^{-1} \pm 1.28\%) \text{ kg CH}_4 / \text{Cabeza} \cdot \text{año}$$

La gráfica de emisiones para los desechos del ganado de engorda en corral (ICaA) indica que es el sistema con menos emisiones ( $5.1 \times 10^{-1} \text{ mg CH}_4$ ) para la masa fermentada. De acuerdo a la tabla 20, la producción total es de  $4.9 \times 10^{-3} \text{ mg CH}_4 / \text{g MS}$ . Al considerar que cada animal defeca 25 kg de estiércol al día, el factor de emisión está dado por:

$$\text{F.E.}_{(\text{ICaA-27}^\circ\text{C})} = (1.17 \times 10^{-2} \pm 2.57\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Para el ganado de engorda en corral en clima templado (ICaC) se observa en la figura que es el sistema con mayores emisiones (17.0 mg CH<sub>4</sub>), para la masa fermentada. Es en el primer período de fermentación, cuando las muestras se fermentan frescas, en que se alcanza la máxima producción de metano y de ahí en adelante las emisiones disminuyen en forma constante. De acuerdo a la tabla 21, la producción total es de  $2.8 \times 10^{-1}$  mg CH<sub>4</sub> / g MS. Al considerar que cada animal defeca 25 kg de estiércol al día, el factor de emisión está dado por:

$$\text{F.E.}_{(\text{ICaC-27}^\circ\text{C})} = (3.96 \times 10^{-1} \pm 0.46\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

La tendencia de las emisiones provenientes de las excretas del ganado bovino lechero estabulado en clima templado (ILC), señalan que es el sistema con el cuarto lugar, pues produce 2.9 mg para el total de muestras fermentadas. En la tabla 22 se consigna que la producción de metano por gramo de MS de estiércol es de  $5.1 \times 10^{-2}$  mg. Considerando que en este sistema se producen 35 kg de estiércol por animal al día, entonces el factor de emisión será:

$$\text{F.E.}_{(\text{ILC-27}^\circ\text{C})} = (9.39 \times 10^{-2} \pm 0.18\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Para el ganado bovino lechero estabulado, la figura indica que es el sistema con el penúltimo lugar, pues produce 1.9 mg CH<sub>4</sub> para el total de muestras fermentadas. En la tabla 23 se consigna que la producción de metano por gramo de MS de estiércol es de  $3.0 \times 10^{-2}$  mg. Considerando que en este sistema se producen 30 kg de estiércol por animal al día, entonces el factor de emisión será:

$$\text{F.E.}_{(\text{ILA-27}^\circ\text{C})} = (5.14 \times 10^{-2} \pm 4.03\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Para la fermentación de excretas a 35°C, los sistemas de producción simulados fueron: Intensivo

Leche, en clima templado (ILC), Intensivo Carne, en clima templado (ICaC), Intensivo Carne, en clima cálido (ICaA), Semi-intensivo Leche, en clima templado (ILC), Semi-intensivo Leche, en clima cálido (ILA), Semi-intensivo Carne, en clima Cálido (S-ICaA), Extensivo Carne y Doble Propósito (EdP).

Al igual que para la temperatura de 27°C, la intención de fermentar muestras de climas templados y climas cálidos a 35°C, fue para determinar la diferencia en las emisiones por efecto de la temperatura y de la alimentación, si era el caso.

Las tendencias en las emisiones para esta temperatura (figura 29) se obtuvieron a partir de las tablas 24 a 30, luego de obtener los promedios en el tiempo y de los valores de las emisiones de CH<sub>4</sub> de cada sistema.

Para el ganado bovino lechero estabulado en climas templados (ILC), el perfil de la gráfica advierte que este sistema tiene una producción aproximadamente constante en los primeros tres períodos, a partir del cual hay un notorio descenso. Este sistema produce 5.2 mg CH<sub>4</sub>, para el total de muestras fermentadas. En la tabla 24 se consigna que la producción de metano por gramo de MS de estiércol es de  $9.0 \times 10^{-2}$  mg. Considerando que en este sistema se producen 35 kg de estiércol por animal al día, entonces el factor de emisión será:

$$F.E._{(ILC-35^{\circ}C)} = (1.67 \times 10^{-1} \pm 8.26\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

La tendencia de las emisiones del ganado de engorda en corral en climas templados (ICaC) indica que es el sistema con menos emisiones (18.0 mg CH<sub>4</sub>), para la masa fermentada. Es en el primer período de fermentación, cuando las muestras se fermentan frescas, en que se alcanza la máxima producción de metano y de ahí en adelante las emisiones disminuyen drásticamente. De acuerdo a

la tabla 25, la producción total es de  $2.8 \times 10^{-2}$  mg CH<sub>4</sub> / g MS. Al considerar que cada animal defeca 25 kg de estiércol al día, el factor de emisión está dado por:

$$F.E._{(ICaC-35^{\circ}C)} = (4.00 \times 10^{-2} \pm 10.81\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

La gráfica de emisiones por desechos del ganado de engorda en corral en climas cálidos (ICCa) señalan que es el sistema con más emisiones (6.1 mg CH<sub>4</sub>), para la masa fermentada. De acuerdo a la tabla 26, la producción total es de  $5.9 \times 10^{-2}$  mg CH<sub>4</sub> / g MS. Al considerar que cada animal defeca 25 kg de estiércol al día, el factor de emisión está dado por:

$$F.E._{(ICaA-35^{\circ}C)} = (1.4 \times 10^{-1} \pm 0.67\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

El perfil de la gráfica de emisiones del ganado lechero semi-estabulado en climas templados (S-ILC) indica que la producción es mayor en el segundo período, a partir de entonces las emisiones descienden rápidamente. Es el quinto sistema en importancia en las emisiones, con una producción de 3.8 mg CH<sub>4</sub>, para las muestras fermentadas. La tabla 27 reporta una producción de  $6.5 \times 10^{-2}$  mg de metano por cada gramo de MS. Si se considera que en los sistemas semi-intensivo se generan 20 kg de estiércol por animal al día, con ello el factor de emisión es de:

$$F.E._{(S-ILC-35^{\circ}C)} = (6.9 \times 10^{-2} \pm 3.30\%) \text{ kg CH}_4 / \text{Cabeza} \cdot \text{año}$$

Para el ganado bovino lechero semi-estabulado en clima cálido (S-ILA), el perfil de las emisiones en el tiempo sugieren que es el sistema con el penúltimo lugar, pues produce 3.2 mg CH<sub>4</sub> para el total de muestras fermentadas. En la tabla 28 se consigna que la producción de metano por gramo de MS de estiércol es de  $4.6 \times 10^{-2}$  mg. Considerando que en este sistema se producen 30 kg de estiércol por

animal al día, entonces el factor de emisión será:

$$F.E._{(S-ILA-35^{\circ}C)} = (5.83 \times 10^{-2} \pm 7.19\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Para el ganado de engorda en producción semi-intensiva, en climas cálidos (S-ICaA) la gráfica de emisiones por muestra sugiere que este sistema ocupa el segundo lugar en la producción de metano para esta temperatura y las muestras fermentadas. Es en el primer período donde más produce (muestras frescas), después la producción disminuye notoriamente. En la tabla 29 se anota que la producción total para las muestras fermentadas es de 5.5 mg CH<sub>4</sub>, y la producción por gramo de MS es de 8.2 x 10<sup>-2</sup> mg. Como las excretas evacuadas por cada animal al día son de 20 kg, entonces el factor de emisión es de:

$$F.E._{(S-ICaA-35^{\circ}C)} = (9.96 \times 10^{-2} \pm 2.32\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Las emisiones por muestra de estiércol del ganado en pastoreo de doble propósito, a 35°C (EdP) esquematizadas en la figura 29 indican que ocupan el cuarto lugar de importancia en la producción (4.0 mg CH<sub>4</sub>). De acuerdo a la tabla 30, la producción de metano por gramo de MS es de 6.3 x 10<sup>-2</sup> mg. Debido a que el ganado en pastoreo genera diariamente del orden de 12 kg de estiércol por animal, entonces el factor de emisión es:

$$F.E._{(EdPA-35^{\circ}C)} = (4.41 \times 10^{-2} \pm 0.31\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Los factores de emisión, mencionados en las secciones IV.6.1 a IV.6.3 para todos los sistemas de producción y temperaturas consideradas, aparecen en la tabla 37, ordenados por función, sistema, y manejo de desechos, para todos los climas y temperaturas.

#### IV.7.4 Factores de emisión por fermentación en laguna anaeróbica

En el curso de las corridas experimentales se observó que la humedad de las muestras juega un papel importante en la cantidad de metano producido, de modo que si la humedad es máxima entonces las emisiones también lo son. Por otro lado, para un mismo sistema de producción se nota que hay una correspondencia directa entre temperaturas y emisiones altas. Debido a ello se procedió a fermentar las muestras en laguna anaeróbica (LA), con una proporción de 1:1 en las muestras frescas y el agua (sin cloro) adicionada a las muestras, a una temperatura de 35°C. De esta manera se obtendrán las emisiones máximas para los sistemas de producción considerados en este tipo de manejo de excretas, que corresponderá a los potenciales máximos de producción de metano ( $B_0$ ) respectivos.

Los sistemas de producción considerados fueron: Intensivo carne en climas cálidos (ICaA), Semi-Intensivo leche en climas templados (S-ILC), Intensivo carne en climas templados (ICC), Intensivo carne con alimentación especial, en climas templados (ICaEC), Intensivo leche en climas templados (ILC) y Extensivo de Doble Propósito en todos los climas (EdP).

Los perfiles de las emisiones por excreta se obtuvieron a partir de los datos consignados en las tablas 31 a 36, luego de promediar los tiempos de fermentación y graficarlos contra las emisiones de cada sistema de producción. La figura 30 presenta las tendencias en las emisiones respectivas.

La gráfica de emisiones para los desechos del ganado de engorda en corral (ICaA) indica que es el sistema con menos emisiones (8.3 mg  $\text{CH}_4$ ) para la masa fermentada. De acuerdo a la tabla 31, la producción total es de  $3.2 \times 10^{-1}$  mg  $\text{CH}_4$  / g MS. Al considerar que cada animal defeca 25 kg de estiércol al día, el factor de emisión está dado por:

$$\text{F.E.}_{(\text{ICaA/LA-35}^\circ\text{C})} = (7.56 \times 10^{-1} \pm 6.80\%) \text{ kg } \text{CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

El perfil de la gráfica de emisiones del ganado lechero semi-estabulado en climas templados (S-ILC) indica que es el quinto sistema en importancia en las emisiones, con una producción de 11.0 mg CH<sub>4</sub>, para las muestras fermentadas. La tabla 32 reporta una producción de 6.2 x 10<sup>-1</sup> mg de metano por cada gramo de MS. Si se considera que en los sistemas semi-intensivo se generan 20 kg de estiércol por animal al día, con ello el factor de emisión es de:

$$F.E._{(S-ILC/LA-35^{\circ}C)} = (7.87 \times 10^{-1} \pm 5.12\%) \text{ kg CH}_4 / \text{Cabeza} \cdot \text{año}$$

Para el ganado de engorda en corral en clima templado (ICaC) se observa en la figura que este sistema ocupa el cuarto lugar en las emisiones (12.0 mg CH<sub>4</sub>), para la masa fermentada. De acuerdo a la tabla 33, la producción total es de 4.5 x 10<sup>-1</sup> mg CH<sub>4</sub> / g MS. Al considerar que cada animal defeca 25 kg de estiércol al día, el factor de emisión está dado por:

$$F.E._{(ICaC/LA-35^{\circ}C)} = (1.07 \pm 7.62\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

La tendencia de las emisiones del ganado de engorda en corral con alimentación especial, en climas templados (ICaEC) indica que es segundo en importancia en las emisiones (19 mg CH<sub>4</sub>), para la masa fermentada. Es en el primer periodo de fermentación cuando se alcanza la máxima producción de metano y de ahí en adelante las emisiones disminuyen constantemente. De acuerdo a la tabla 34, la producción total es de 7.2 x 10<sup>-1</sup> mg CH<sub>4</sub> / g MS. Al considerar que cada animal defeca 25 kg de estiércol al día, el factor de emisión está dado por:

$$F.E._{(ICaEC/LA-35^{\circ}C)} = (1.71 \pm 6.03\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Para el ganado bovino lechero estabulado en climas templados (ILC), el perfil de la gráfica advierte

que este sistema es el mayor productor. Este sistema genera 55.0 mg CH<sub>4</sub>. En la tabla 35 se consigna que la producción de metano por gramo de MS de estiércol es de 38.0 mg. Considerando que en este sistema se producen 35 kg de estiércol por animal al día, entonces el factor de emisión se da por:

$$F.E._{(ILC/LA-35^{\circ}C)} = (7.05 \pm 4.08\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

Las muestras del ganado en pastoreo (EdP) generan un perfil que corresponde al tercer lugar en importancia de producción (13 mg). De acuerdo a la tabla 36, la producción de metano por gramo de MS es de  $8.1 \times 10^{-1}$  mg. Debido a que el ganado en pastoreo genera diariamente del orden de 12 kg de estiércol por animal, entonces el factor de emisión es:

$$F.E._{(EdP/LA-35^{\circ}C)} = (5.68 \times 10^{-1} \pm 8.37\%) \text{ kg CH}_4 / \text{cabeza} \cdot \text{año}$$

#### **IV.8 Emisiones de metano por sistemas y funciones de producción**

En los resultados anteriores se presentaron las emisiones de metano para todos los sistemas de producción, con el clima y la temperatura como parámetros. Ahora se dan los mismos resultados, pero dando prioridad a la función de la producción, para así visualizar, para una misma función, las diferencias por el efecto de la alimentación asociada al clima, y a la temperatura de secado y fermentación de las muestras. Los resultados comprenden las funciones de producción de leche, carne, y doble propósito.

Para poder presentar las emisiones como función del tiempo, fue necesario “estimar” las emisiones para determinados tiempos de cada uno de los sistemas. Para ello se consideró válido que entre un punto experimental y el siguiente hay una recta que los une.

Para una recta se tiene que  $Y = mX + b$ . Donde en este caso Y es la producción de metano, en mg,

al tiempo  $X = t$ , en días. La pendiente  $m$  se obtuvo de:  $m = (Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1)$ . La ordenada al origen se obtuvo de:  $b = [(Y_1 + Y_2) / 2] - m[(X_1 + X_2) / 2]$ .

Una vez que se tienen los modelos matemáticos para los intervalos entre cada punto experimental, se interpola para estimar las emisiones asociadas a cada tiempo fijo predeterminado para todos los sistemas y funciones estudiadas.

#### **IV.8.1 Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado**

En la figura 31 se presentan las tendencias, para diferentes temperaturas, en las emisiones de metano para muestras de excretas de bovino lechero en sistemas intensivos de producción (IL), con secado. Puede observarse que hay cierta proporcionalidad entre las emisiones y la temperatura, ya que a una temperatura mayor corresponden emisiones mayores. Sin embargo, para “27°C Cá y 22°C”, las curvas casi se empatan. Algo similar ocurre con las temperaturas “17°C y 21°C”.

Debe notarse además que para la temperatura de 35°C las emisiones son muy superiores a todas las demás. La tabla 37 exhibe los valores de los factores de emisión, donde se ve que para excretas con secado, son las de bovino lechero estabulado, provenientes de clima templado y fermentadas a 35°C, las que tienen el valor más grande ( $1.67 \times 10^{-1}$  kg CH<sub>4</sub> / cabeza · año). En la misma tabla 37 para la fermentación en laguna anaeróbica se obtiene un factor de emisión de 7.05 kg CH<sub>4</sub> / cabeza · año. Al comparar los valores anteriores se nota que el factor para laguna anaeróbica es 42.2 veces mayor que en el caso de secado.

#### **IV.8.2 Emisiones de metano por excretas de sistemas semi-intensivos**

La figura 32 exhibe las tendencias obtenidas por interpolación, para muestras provenientes de

sistemas semi-intensivos, con secado. Aquí, las excretas de climas templados y fermentadas a 27°C ( $1.11 \times 10^{-1}$  kg CH<sub>4</sub> / cabeza · año) son la que más metano producen. En contraparte, las muestras fermentadas a 12°C producen un mínimo de gas. Este comportamiento es consistente con los factores presentados en la tabla 37. Al comparar el máximo valor para muestras con secado, con el valor para muestras en laguna anaeróbica ( $7.87 \times 10^{-1}$  kg CH<sub>4</sub> / cabeza · año) se observa una producción mayor para esta última en 7.1 veces.

#### **IV.8.3 Emisiones de metano por excretas de bovinos de engorda**

La figura 33 indica que las excretas de clima templado y secadas y fermentadas a 27°C son las de mayor producción ( $3.96 \times 10^{-1}$  kg CH<sub>4</sub> / cabeza · año). Sin embargo este mismo tipo de excretas secadas y fermentadas a 35°C producen 99 veces menos que a 27°C. Es notorio también que para 22°C las emisiones ocupan el segundo lugar como productor.

En términos generales, a bajas temperaturas se produce poco metano, en comparación a las temperaturas altas. Sin embargo, en cuanto a los climas, no se observa un patrón relacionado a la temperatura, por lo que el tipo de alimento que consume el ganado de engorda debe ser el factor principal para la generación de metano por las excretas.

A partir de la tabla 37, cuando se compara el factor de mayor producción con secado con el de producción en laguna anaeróbica (1.07 kg CH<sub>4</sub> / cabeza · año), se ve una diferencia de 2.7 veces a favor del último.

#### **IV.8.4 Emisiones de metano por excretas de bovinos en pastoreo**

La figura 34 muestra una gran regularidad en las emisiones como función de la temperatura, ya que

a bajas temperaturas hay bajas emisiones; y a temperaturas altas corresponden altas emisiones. El comportamiento tan regular observado en relación a la temperatura, se debe seguramente a que el alimento consumido por el ganado, es en general del mismo tipo.

De acuerdo a la tabla 37, el factor de emisión máximo con secado es de  $4.41 \times 10^{-2}$  kg CH<sub>4</sub> / cabeza · año, mientras que para laguna anaeróbica es de  $5.68 \times 10^{-1}$  kg CH<sub>4</sub> / cabeza · año, lo cual representa un excedente de 128.8 veces para la fermentación en laguna anaeróbica.

#### **IV.9 Potenciales máximos de producción y Factores de Conversión de Metano**

Los valores consignados en la tabla 37 señalan que durante la fermentación en laguna anaeróbica se produce la cantidad máxima de metano para todos los tipos de excretas, comparada con las emisiones con secado de muestras. Por tanto, puede considerarse que las emisiones obtenidas durante la fermentación en laguna anaeróbica son la base para determinar los potenciales máximos B<sub>0</sub>, para excretas de bovino de cada sistema y función de la producción.

Al aplicar los datos de CH<sub>4</sub> [mg] de las tablas 3 a 36 en las ecuaciones (11) y (12) se obtienen las emisiones de metano, en m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV. La tabla 38 presenta las emisiones totales para cada sistema y temperatura. En dicha tabla se observa que para excretas en laguna anaeróbica a 35°C las emisiones son máximas. Para estiércol de ganado lechero estabulado de climas templados (ILC) se obtienen  $(0.169 \pm 2.82\%)$  m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV. Para excretas de ganado lechero de climas templados, en producción semi-intensiva (S-ILC) se calcularon  $(0.033 \pm 2.93\%)$  m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV. El ganado productor de carne en climas templados con alimentación especial (ICaEC) genera  $(0.058 \pm 2.31\%)$  m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV. Finalmente, el ganado en pastoreo de doble propósito emite  $(0.0401 \pm 5.24\%)$  m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV.

Al considerarse que las emisiones en laguna anaeróbica representan el 90% del  $B_0$  respectivo (IPCC, 1996), entonces los  $B_0$  obtenidos en este estudio son:

*Potenciales máximos de emisión de metano ( $B_0$ ), en  $m^3 / kg SV$*

IL	S-IL	ICa	EdP
$0.188 \pm 2.8\%$	$0.037 \pm 2.9\%$	$0.064 \pm 2.3\%$	$0.0445 \pm 5.2\%$

A partir de estos valores se obtienen los factores de conversión de metano (FCM) para cada sistema y función de la producción y temperatura. La tabla 39 presenta los valores, en porcentaje, de estos FCM. Se ve en esa tabla que para las muestras con secado, al sistema ILC a 35°C le corresponde un 2.1% y al sistema ILC a 27°C, un 1.2%. Para las temperaturas restantes los valores no llegan al 1%. En cuanto a los sistemas lecheros semi-intensivos (S-IL), los factores significativos son de 12.7% para 27°C y 7.9% para 35°C. Es notorio que el menor de todos corresponde a 12°C, con 0.34%. Los FCM para ganado de engorda indican que a 27°C y 22°C se alcanzan los valores más grandes, con el 20.9% y el 10.2%, respectivamente. Por último, las excretas de ganado en pastoreo tienen FCM mayores a 35°C, con el 6.13%; y a 27°C, con el 6%. Los restantes factores no rebasan el 1.7%.

## V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Se observó que en las muestras precongeladas las emisiones disminuye por la congelación. Como no se contaba con la metodología de inoculación para el control de la población bacteriana al inicio de las corridas experimentales, entonces se utilizaron sólo muestras frescas. Si las muestras hubieran sido inoculadas sin un control adecuado los resultados carecerían de confiabilidad, por la disparidad en los valores para un mismo tipo de muestras.

En relación al alimento consumido por los animales, se observa que en los sistemas intensivos se tienen los de mejor calidad. No obstante, la alimentación no está claramente relacionada con la cuantificación de nutrientes en las excretas, debido seguramente a factores como: la carencia, en general, de datos confiables sobre la cantidad total de alimento consumido por cada animal, así como las proporciones suministradas a los animales de cada componente de la dieta; los complejos procesos de fermentación entérica, el efecto de las condiciones sanitarias en la producción, el control del estado de salud de los animales, los diferentes sistemas y funciones de la producción, las diferentes variedades de cada alimento en función del clima donde se cultivan y en consecuencia del contenido de nutrientes y energía de tales alimentos. No obstante lo anterior, fue posible establecer globalmente cómo afecta el tipo de alimento a las emisiones de metano.

Las variaciones al día de la presión de gas producido y de la concentración de metano en ese gas, como función del tiempo, muestran patrones semejantes de comportamiento, al registrarse emisiones máximas, en general, durante los primeros dos o tres períodos de fermentación, para luego experimentar un descenso continuo hasta anularse (figuras 18, 19 y 20). Esto guarda una estrecha relación con las emisiones de metano como función de la humedad contenida en las excretas, ya que para estos mismos períodos la humedad se conserva entre el 60% y 70%, y si el sustrato nutritivo

de las excretas y la temperatura son propicias, la población bacteriana se incrementa, a pesar de la falta de agua, generándose en consecuencia una gran cantidad de metano (figura 21).

Para las muestras con secado, el efecto de pH en las emisiones es notable, ya que para valores de pH menores a 7.5, mientras mayor es la rapidez de acidificación de las muestras ( $\Delta\text{pH}/\Delta t$ ), mayor es la rapidez con que las emisiones disminuyen ( $\Delta E/\Delta t$ ). Si el pH es mayor a 7.5 y el descenso de ( $\Delta\text{pH}/\Delta t$ ) no es rápido, entonces ( $\Delta E/\Delta t$ ) mantiene un descenso lento, observándose en consecuencia grandes emisiones de metano al término de los períodos de fermentación. Se observa que siempre se alcanza un mínimo de pH, a partir del cual sus valores se incrementan ligeramente (figura 22).

El ( $\Delta\text{pH}/\Delta t$ ) de las excretas en laguna anaeróbica no es mucho mayor que en el secado, sin embargo, debido a que la fermentación dura más tiempo el  $\Delta\text{pH}$  es mayor, como mayores son también las emisiones de  $\text{CH}_4$  para todos los sistemas y funciones de la producción consideradas.

En relación a los factores de emisión de metano como función de los climas, es el sistema extensivo de doble propósito en climas fríos el que menos metano produce, con 0.16 g  $\text{CH}_4$  por animal al año, que es un valor realmente pequeño en comparación con las emisiones generadas por excretas del mismo tipo, pero secadas y fermentadas en climas cálidos, a 35°C, con una producción de 44.1 g  $\text{CH}_4$  por animal al año, emisiones 288 veces mayor al clima frío.

Para el clima templado las emisiones menores, 3.44 g  $\text{CH}_4$  / animal · año, corresponden al sistema de pastoreo y temperatura de 17°C. Este factor es inferior 115 veces al factor máximo, 396 g  $\text{CH}_4$  / animal · año, correspondiente a excretas del ganado de engorda y fermentadas a 27°C.

Para el clima cálido el menor de los factores tiene un valor de 11.7 g  $\text{CH}_4$  / animal · año, para el sistema de engorda a 27°C, mientras que el mayor 140.0 g  $\text{CH}_4$  / animal · año a 35°C, para el mismo tipo de ganado. Esto significa que para una alimentación similar es la temperatura el factor que

determina la diferencia en las emisiones.

Hablando de funciones de producción, se nota que es la alimentación la que determina fundamentalmente la cantidad de metano generado (ganado en producción semi-intensiva y ganado de engorda). Si se tiene una misma alimentación es entonces la temperatura el factor dominante en la producción de este gas (ganado lechero y ganado en pastoreo).

En cuanto a la alimentación, se sabe que el ganado lechero consume principalmente forraje, el cual puede ser verde, achicalado, en silo y seco. Consume además, pero en menor proporción, granos molidos y harinas. En contraparte, el ganado de engorda consume principalmente granos molidos, y en menor proporción algunos forrajes, generalmente secos, y verdes en época de lluvias.

Se nota también que cuando la dieta se constituye por granos y no contiene forraje verde, las emisiones son mínimas (ganado de engorda en clima cálido). Pero si la dieta contiene granos, balanceados adecuadamente con forraje verde y semiseco (ganado de engorda en clima templado con alimentación especial [ICaEC]), entonces las emisiones de metano son máximas.

Los factores que se presentan en la tabla 37 fueron obtenidos directamente, unos a partir del secado y fermentación de las muestras y otros de su fermentación en laguna anaeróbica. En este sentido son factores absolutos. Estos factores de emisión reflejan las condiciones climáticas así como las características pecuarias de ganado bovino en las regiones geográficas consideradas.

La comparación de los factores de emisión propuestos para América Latina por el IPCC con los factores paralelos por secado de muestras obtenidos en este trabajo, no es muy apropiada debido a que los valores del IPCC están únicamente en función de la temperatura (clima) y la función de la producción (leche o carne), mas no en función del contenido de humedad de las muestras. Sin embargo, dicha comparación se presenta a fin de visualizar las diferencias entre ambas propuestas,

en la inteligencia de que los valores corresponden sólo al sistema intensivo de producción.

*Factores de emisión de metano del IPCC (1996) y de este estudio, en kg CH<sub>4</sub> / animal · año.*

Clima	Ganado lechero			Ganado de engorda		
	IPCC	Propio	IPCC/Propio	IPCC	Propio	IPCC/Propio
Frío	0	1.78 x 10 <sup>-2</sup>	0.0	1	8.96 x 10 <sup>-4</sup>	1116
Templado	1	5.92 x 10 <sup>-2</sup>	17	1	3.96 x 10 <sup>-1</sup>	3
Cálido	2	1.67 x 10 <sup>-1</sup>	12	1	1.17 x 10 <sup>-2</sup>	85

Donde IPCC/Propio indica el número de veces que el factor del IPCC es mayor al propio.

Debido a que los factores obtenidos son menores a los propuestos por el IPCC, al ser aplicados al inventario de emisiones de metano en esta región geográfica, los resultados se verán reducidos en determinada cantidad, dependiendo ésta del peso que tengan los factores en la población de ganado.

A continuación se presenta la distribución del ganado por climas en el centro de México, para los Estados incluidos en este estudio, respecto al hato nacional (González Avalos, 1994); así como la disminución que tendrán las emisiones al aplicar los factores propios en lugar de los del IPCC.

*Efecto sobre las emisiones de CH<sub>4</sub> utilizando FEM propios y FEM del IPCC.*

Clima	Ganado lechero			Ganado de engorda			Suma de pesos
	I/P	E [%]	Peso	I/P	E [%]	Peso	
Frío	0.0	0.55	+0.56	1116	0.24	-2.68	-2.12
Templado	17	20.20	-3.43	3	8.68	-0.26	-3.69
Cálido	12	4.69	-0.56	85	2.02	-1.72	-2.28
						peso total	-8.09

Donde: I/P = IPCC / Propio; E = Existencias de bovinos; Peso = Factor de peso de las existencias de ganado sobre las emisiones de metano.

Lo anterior significa que los factores del IPCC sobreestiman en 8 veces las emisiones de metano por la fermentación de excretas con secado.

Los factores propuestos por Steed y Hashimoto (1994) y el IPCC (1996), son expresados en términos de los potenciales máximos de producción de metano ( $B_0$ ) para el ganado lechero estabulado y para el ganado de engorda, vía los factores de conversión de metano (FCM). El IPCC propone para América Latina potenciales máximos ( $B_0$ ) de  $0.13 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$  para excretas de ganado bovino lechero y de  $0.10 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$  para bovinos de engorda. En este estudio se obtuvo para el ganado lechero  $0.188 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$ . Este valor es mayor en un 44.6% al asignado para América Latina y menor en 27.6% respecto al asignado a U.S.A. ( $0.24 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$ ). En cuanto al ganado de engorda, este estudio asigna un valor de  $0.064 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$ , que es menor en un 34% al que propone el IPCC para América Latina. Adicionalmente aquí se proponen  $B_0$  para los sistemas semi-intensivos lecheros y para extensivos en pastoreo. El hecho de que los  $B_0$  aquí obtenidos estén dentro del rango de valores que propone el IPCC, representa una prueba de la validez de la metodología empleada en este estudio. Una vez que se tienen los  $B_0$ , se calculan los FCM para cada sistema y función de la producción. Una comparación de los FCM del IPCC y los obtenidos aquí son:

*FCM por sistema de manejo de excretas para bovinos lecheros y de engorda, en %.*

Clima	Laguna anaeróbica			Almacenamiento		Corral		Pastoreo	
	IPCC	Propio		IPCC	Propio	IPCC	Propio	IPCC	Propio
	L y C	L	C	L y C	L <sup>s</sup>	L y C	C <sup>s</sup>	L y C	DP <sup>s</sup>
Frío	90	90	90	1	0.23	1	0.10	1	0.02
Temp.	90	90	90	1.5	0.43	1.5	6.75	1.5	1.04
Cálido	90	90	90	2	1.31	5	7.94	2	6.06

Donde: L = Leche; C = Carne; DP = Doble Propósito; s = con secado.

Puede verse en la tabla anterior, que todos los FCM obtenidos para ganado lechero son menores a los propuestos por el IPCC. Para los demás sistemas de manejo de excretas, la mayoría de los FCM propios son mayores a los del IPCC, lo cual no significa que las emisiones vayan a ser mayores, ya que los  $B_0$  respectivos son menores en un 34%.

En relación al efecto invernadero se sabe que el metano contribuye con el 15%. Del total de emisiones de metano por todas las fuentes, las excretas de bovino contribuyen con aproximadamente el 7%, de modo que esta fuente contribuye al efecto invernadero con el 1.05% (IPCC, 1990). Así entonces, la disminución en los cálculos de las emisiones de metano por las excretas de ganado bovino incidirán muy poco en los resultados que se obtengan al aplicar los datos de los inventarios de emisiones a algún modelo de predicción en el contexto del cambio climático global.

## VI. CONCLUSIONES

La metodología propuesta para la determinación experimental de los factores de emisión de metano, considerando el secado y fermentación de excretas de bovino ha demostrado ser eficiente.

El dispositivo para el secado de muestras a temperatura constante mostró ser adecuado, puesto que el secado se logró en un tiempo aproximadamente igual al que tardan las muestras al estar expuestas a aire libre.

En cuanto al proceso de secado se observó que durante los primeros días la población de bacterias debe incrementarse significativamente, a pesar de que el contenido de agua en el estiércol disminuye.

El sistema integrado por el baño térmico de agua circulante, con control automático de temperatura, y capacidad para mantener temperaturas entre 5°C y 50°C respondió adecuadamente a las expectativas, ya que no presentó fallas en su funcionamiento.

El sistema para la medición de la presión del gas producido, jugó un importante papel, al permitir medir la presión directamente a partir de los datos recabados.

Fue muy importante detectar el efecto de la congelación de las muestras de estiércol por más de dos días, ya que de otra forma habría una estimación de la presión del gas y de las concentraciones de metano muy por debajo de las reales.

En cuanto al análisis químico proximal, se observó una dependencia del contenido de productos en las excretas con el clima, ya que para climas cálidos estos productos fueron, en general, más abundantes. Lo cual significa que el metabolismo de los animales de estas regiones es tal que una cantidad mayor de nutrientes no se aprovechan, en comparación a los animales de climas templados.

La curva de calibración de metano que establece la relación funcional entre la altura de los cromatogramas y la concentración de metano (figura 13), cubre desde concentraciones menores al

1% hasta mayores al 6%, lo que permitió extrapolar e interpolar con un grado aceptable de confiabilidad.

Luego de ver las tendencias en la producción de metano para todos los sistemas en general, no se puede afirmar que el séptimo día de fermentación sea representativo de la producción de gas para los anteriores seis días, como se supuso en el trabajo de Steed y Hashimoto, ya que cada sistema presenta velocidades de producción de metano que cambian con la temperatura y el tipo de alimento consumido.

En relación al secado y fermentación de las muestras, la pérdida de humedad con el tiempo se expresa adecuadamente como una función exponencial para todos los sistemas de producción ganadera.

De acuerdo a los factores de emisión obtenidos (tabla 37), se concluye que es la alimentación la que determina fundamentalmente la cantidad de metano generado, ya que para un tipo único de alimento, es la temperatura el factor dominante en la producción. Así mismo, si la dieta consiste mayoritariamente en granos y no contiene, o es muy escaso el forraje verde, entonces las emisiones son mínimas; pero si la dieta contiene granos y forrajes verde y semiseco en buena proporción, entonces las emisiones de metano son máximas.

Por otro lado, los factores de emisión propios para excretas con secado son menores en un factor de 8 a los propuestos por el IPCC para América Latina, de modo que al aplicarlos, los inventarios de emisiones se verán muy reducidos. Los factores de emisión para excretas fermentadas en laguna anaeróbica fueron los de mayor magnitud, por lo que se tomaron como referencia para la obtención de los potenciales máximos de emisión ( $B_0$ ). Los  $B_0$  obtenidos para ganado lechero y de engorda están dentro del rango propuesto por el IPCC para América Latina, lo cual demuestra que los

resultados alcanzados son correctos.

Los factores de conversión de metano (FCM) obtenidos son, en general, menores a los propuestos por el IPCC (1996) y comprenden diversos sistemas de producción, como el lechero semi-intensivo, extensivo de doble propósito y semi-intensivo de engorda, que no son considerados por el IPCC.

Por tanto, los factores de emisión, los  $B_0$  y los FCM obtenidos en este estudio podrán aplicarse a todos aquellos países con características pecuarias y climáticas semejantes a las de México, lográndose con ello una mejor estimación global de las emisiones de metano, lo que a su vez podría llevar a una reevaluación de sus efectos sobre el cambio climático global.

## VII. REFERENCIAS

Arrhenius, S. 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philos.* 41: 237-276.

Ellingson, R.G., J. Ellis and S.B. Fels, 1991. The intercomparison of radiation codes used in climate models: Long wave results. *J. Geophys. Res.*, 96,8929-8953.

Fuente, Juan de la. 1989. Bonanza y crisis de la ganadería nacional. Una visión integral de la actividad pecuaria en México. Por Juan de la fuente, et al. México, Universidad Autónoma de Chapingo.

Galicia Rosas, Elsa Adela. 1982. Estudio sobre la obtención de metano en digestores de estiércol de bovino. Tesis de Licenciatura (Químico Farmacéutico Biólogo) UNAM, Fac. de Química.

González Avalos, E. 1995. Inventarios de emisiones de metano y óxido nitroso por actividades agropecuarias en México durante 1990. Resultados a partir de las metodologías de la EPA y el IPCC. En: Memorias del segundo taller de estudio de país: México. México ante el cambio climático. Cuernavaca, Mor., 8 a 11 de mayo de 1995. México, Instituto Nacional de Ecología, 1995.

Goody, R.M. 1989. Atmospheric radiation. Theoretical basis. Second edition. By R.M. Goody and Y.L. Yung. New York, Oxford University Press, 1989.

IPCC, 1990. Climate change. The IPCC Scientific Assessment. J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J.Ephraums (Eds). Cambridge, Cambridge Univ. Press.

IPCC, 1994. Climate change 1994. Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. J.T. Houghton et al (Eds).

IPCC, 1996. Greenhouse Gas Inventory, 3 vols. London, IPCC/OECD, 1996.

Kratz, D.P., M.D. Chou and M.M.H. Yan, 1993. Infrared radiation parametrizations for the minor CO<sub>2</sub> bands for several CFC bands in the window region. *J. Climate*, 6, 1269-1281.

Lelieveld, J., P.J. Krutzen and C. Brühl, 1993. Climate effects of atmospheric methane. *Chemosphere*, 26, 739-768.

Lenoble, Jacqueline. 1993. Atmospheric radiative transfer. Hampton, Virginia USA, A. Deepak, 1993.

Ramanathan, V. 1987. Climate-chemical interactions and effects of changing atmospheric trace gases. By V. Taranathan, L. Callis, R. Cess, J. Hansen, I. Isaksen, W. Kuhn, A.Lacis, F. Luther, J. Mahlman, R. Reck, and M. Schlesinger. *Rev. of Geophysics*. 25, 7 (1441-1482). 1987.

Rind D. and A. Lacis. 1993. The role of the stratosphere in climate change. *Surveys in Geophysics*,

14, 133-165.

Safley, L.M. 1992. Global methane emissions from livestock and poultry manure. By L.M. Safley Jr., M.E. Casada, J.W. Woodbury, and Kurt F. Roose. U.S.A., U.S. Environmental Protection Agency, 1992.

Salby, Murry L. 1996. Fundamentals of atmospheric physics. Academic Press, San Diego, U.S.A.

Shi, G. and X. Fan, 1992. Past, present and future climatic forcing due to greenhouse gases. Adv. In Atmos. Sci., 9, 279-286.

Shine, K.P., 1993. The greenhouse effect and stratospheric change. In: The role of stratosphere in global change, M-L. Chanin (ed), NATO ASI series, Springer.

Sosa, E. 1981. Manual de procedimientos analíticos para alimentos de consumo animal. Chapingo, Méx., Universidad Autónoma Chapingo.

Stafford, David A. 1980. Methane production from waste organic matter. By David A. Stafford, Dennis L. Hawkes, and Rex Horton. Florida, CRC, 1980.

Steed, John Jr. and Andrew G. Hashimoto. 1993. Methane emission from typical manure management systems. Biores Tech, 50 (1994) 123-130.

Tejeda, I. 1992. Control de calidad y análisis de alimentos para animales. México, Sistemas para Educación Continua en Producción animal.

Tyndall, J. 1861. On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption and conduction. Philos. Lecture to Royal Society, February 7, 1861, 167-285.

## **A N E X O 1**

**CUESTIONARIO SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GANADO BOVINO  
PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE  
METANO POR EXCRETAS, COMO FUNCIÓN DE LOS CLIMAS EN  
MÉXICO.**

**CUESTIONARIO SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GANADO BOVINO, PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE METANO POR EXCRETAS, COMO FUNCIÓN DE LOS CLIMAS EN MÉXICO.**

Estado: \_\_\_\_\_ Municipio: \_\_\_\_\_ Localidad: \_\_\_\_\_ Clima \_\_\_\_\_

no llenar

Nombre del propietario: \_\_\_\_\_

Domicilio: \_\_\_\_\_ Teléfono: \_\_\_\_\_

**Características del ganado bovino**

**A) Función de la producción (marque con una X):**

Carne

Leche

Carne y doble propósito

**B) Sistema de producción (marque con una X):**

Intensivo (animales en corral o establo)

Semi-intensivo (animales en corral o establo y también en pastoreo)

Extensivo (animales en pastoreo)

**C) Razas que integran cada sistema de producción (escriba el nombre).**

TABLA 1: RAZAS DE GANADO BOVINO POR SISTEMA DE PRODUCCIÓN.		
Intensivo	Semi-intensivo	Extensivo

**D) Número de animales** (llene una o varias tablas de acuerdo a los tipos de ganado que posee).

Nota: Si durante el año el número de animales es aproximadamente el mismo, en la sección “Epoca del año” llene sólo el espacio asignado a “Anual”, en caso contrario llene el espacio según la época.

TABLA 2: EXISTENCIAS DE GANADO.			
Función: _____ Sistema de producción: _____			
Estrato por edades	Epoca del año		
	Secas	Lluvias	Anual
0 - 1 años (hembras y machos)			
1 - 2 años (hembras y machos)			
2 - 3 años (machos)			
más de 3 años (machos)			
Vacas secas o en producción			

**E) Cantidad promedio de alimento que consume cada animal al día, en kg.**

A partir de la siguiente clasificación y tipos de alimentos, llene la tabla 3.

E Ensilados. Caña o cañuela de maíz, sorgo, alfalfa, planta de piña, bagazo de manzana, etc.

ES Esquilmos agrícolas o agroindustriales. Rastrojo de maíz, cascarilla de algodón, pulidura de arroz, bagazo de caña de azúcar, grano seco de cervecería, olote, paja de trigo, cáscara de naranja, paja de frijol, bagazo de manzana, paja de cacahuate, cáscara deshidratada de

cítricos, salvado de trigo, etc.

F Forraje. Heno de alfalfa, alfalfa achicalada, caña de azúcar picada, etc.

G Granos. Sorgo, maíz, trigo, cebada, etc.

H Harinas. Carne y hueso, hueso, pescado, alfalfa, sangre, etc.

L Leche. Leche entera, calostros, etc.

M Minerales. Roca fosfórica, sal común, minerales traza, piedra caliza, bicarbonato de sodio, etc.

PI Pastos inducidos. Animales que se alimentan de pastos inducidos o cultivados para alimento del ganado, con aplicación de fertilizante. El consumo del pasto puede ocurrir en el lugar donde crece el pasto, o bien en corrales a donde se les lleve el alimento.

Alfalfa fresca, estrella, elefante, buffel, pangola, japonés, etc.

PN Pastos naturales o grama nativos. Animales que pastan libremente en los agostaderos con pastos nativos o no inducidos, con o sin aplicación de fertilizante.

S Suplementos. Melaza, acemite de trigo, pollinaza, bovinaza, soca de sorgo, pasta de girasol, pasta de soya, harinolina, concentrado de iniciación, pasta de coco, pasta de cártamo, pasta de ajonjolí, pasta de jojoba, malta, etc.

Nota 1: Por cada “Función de la producción”, “Sistema de producción”, y “Estrato por edad” diferentes utilice una tabla.

Nota 2: Si durante todo el año, el tipo y cantidad de alimento es aproximadamente el mismo, en la sección “Epoca del año” llene sólo el espacio asignado a “Anual”, en caso contrario llene el espacio según la época.

**TABLA 3: ALIMENTO QUE CONSUME AL DÍA EL GANADO BOVINO, EN KG.**

Función: \_\_\_\_\_ Sistema de producción: \_\_\_\_\_

Estrato por edad (de acuerdo a la tabla 2) \_\_\_\_\_

Tipo de alimento	Epoca del año		
	Secas	Lluvias	Anual
Ensilados			
Esquilmos			
Forrajes			
Granos			
Harinas			
Leche			
Minerales			
Pastos Inducidos			
Pastos naturales			
Suplementos			
Total			

**F) Sistemas de manejo del estiércol de bovinos.** Indique el número de días que dura cada tipo de manejo del estiércol que utiliza en cada época del año.

Nota 1: Si durante todo el año, el manejo del estiércol es aproximadamente el mismo, en la sección "Epoca del año" llene sólo el espacio asignado a "Anual", en caso contrario llene el espacio según la época.

TABLA 4: MANEJO DEL ESTIERCOL DE GANADO BOVINO			
Tipo de manejo	Periodicidad aproximada, en días, en cada época del año		
	Secas	Lluvias	Anual
Almacenamiento sólido con humedad natural			
Almacenamiento en lagunas, fosas o lugares húmedos			
Procesamiento en digestores anaeróbicos			
Almacenamiento en seco			
Traspaleo			
Esparcido en cultivos			
Por pastoreo (permanece en los agostaderos o el campo)			
Permanece en el corral			
Quemado como combustible			

Nombre de quien proporciona los datos: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

## **A N E X O 2**

### **RELACIÓN ENTRE PRESIÓN Y VOLTAJE**

## **Relación entre Presión y Voltaje**

Material, equipo y procedimiento experimental desarrollado para la calibración del indicador de presión, mediante la utilización de un transductor y la señal enviada a un voltímetro.

### **Material y equipo**

- Manómetro en forma de "U" (General Metal Works), con capacidad de 12 plg por arriba y por abajo del nivel cero para ambas columnas del manómetro. Resolución de 0.1 plg.
- Mercurio.
- Bomba de vacío y compresión (GAST) con manómetro de carátula circular de 2 plg, de 1/4 HP, con capacidad de flujo de 2.0 m<sup>3</sup>/h.
- Transductor de presión (Model SA), con rango de 0 - 25 PSIA y salida máxima de 5V.
- Multímetro (FINEST, 285).
- Fuente de poder. Entrada de 110 VCA. Salida de 15 VCD.
- Contenedor cilíndrico sellado, fabricado en aluminio, de 0.1 m de diámetro por 0.25 m de longitud; con tapa, válvula de bola y válvula de aguja.
- Manguera y conexiones.

### **Procedimiento**

- i) El mercurio fue vertido en el manómetro hasta alcanzar el nivel "cero" de referencia, correspondiente a la presión atmosférica local.
- ii) Se unió el transductor al contenedor, utilizando para ello la base exagonal con cuerda del transductor.
- iii) Se estableció un circuito eléctrico entre el transductor, el multímetro y la fuente de poder.

La figura 8 exhibe el circuito eléctrico empleado.

- iv) Utilizando la manguera, las conexiones y la válvula de aguja, se conectó el contenedor a un extremo del manómetro con forma de “U”. El extremo libre del manómetro permaneció abierto.
- v) Con el empleo de la bomba se extrajo el aire del contenedor a través de la válvula de esfera, hasta llegar a un vacío, leído en el manómetro de carátula, de 380 mbar.
- vi) Se abrió lentamente la válvula de aguja para permitir la entrada de aire, de manera que el mercurio incrementara su altura en la columna. Las lecturas se dieron desde una altura mínima de  $(1.0 \pm 0.05)$  plg, hasta una máxima de  $(12.3 \pm 0.05)$  plg. En este caso se efectuaron 22 lecturas.
- vii) Para cada lectura en el manómetro de mercurio se tomó la correspondiente lectura en el multímetro.
- viii) Utilizando la compresión de la bomba se incrementó la presión en el contenedor, hasta que el mercurio alcanzó una altura máxima de  $(10.2 \pm 0.05)$  plg. A partir de entonces se permitió la entrada lenta de aire por la válvula de aguja, hasta llegar a un mínimo de  $(0.0 \pm 0.05)$  plg. En este caso se tomaron 13 lecturas.
- ix) Utilizando las lecturas de vacío y presión se elaboró una tabla de datos de presión contra voltaje. La gráfica obtenida se presenta en la figura 9. La ecuación representativa es:

$$P = \frac{V}{0.004} \quad (11)$$

## **ANEXO 3**

### **FERMENTACIÓN DE MUESTRAS Y MEDICIÓN DEL GAS PRODUCIDO**

## **Fermentación de muestras y medición del gas producido.**

Cuando una muestra se depositó en el fermentador se cumplió con el siguiente procedimiento:

- Asegurarse que la cuerdas de la tapa y el bote o fermentador, así como la junta o empaque tuvieran suficiente grasa de silicón para mantener un sellado perfecto. Luego tapar el bote.
- Purgar el aire del interior del bote, utilizando para ello un pequeño flujo de nitrógeno. La circulación del nitrógeno se realizó mediante las dos válvulas acopladas a la tapa del bote. La presión al interior del bote, luego de cerrar ambas válvulas, debía ser mayor a la atmosférica y menor a la correspondiente a 5.000 V, indicada ésta en el multímetro, para evitar daños al transductor de presión.
- Verificar que no haya fugas en el bote, mediante su introducción en una cuba de agua, durante un minuto aproximadamente.
- Activar el multímetro.
- Colocar el fermentador dentro del baño térmico.
- Conectar el conducto que une las válvulas primaria y secundaria del fermentador.
- Asegurarse que todas las válvulas secundarias de los fermentadores estuvieran cerradas, así como las válvulas de paso de nitrógeno y de despresurización.
- Abrir sólo las válvulas primaria y secundaria del fermentador en turno.
- Verificar que el valor de la lectura en el multímetro no disminuyera. De este modo se aseguraba que no hubiera fugas mínimas.
- Abrir la válvula de despresurización, lentamente, hasta que la presión en el fermentador correspondiera a una lectura de 3.200 V en el multímetro. De este modo la presión interna

era ligeramente mayor a la atmosférica, y con ello se confirmaba que había sólo nitrógeno al interior del fermentador, además de la muestra de estiércol. La presión correspondiente a 3.200 V era entonces la presión mínima de referencia.

- El proceso descrito se repitió para todos y cada uno de los fermentadores.

### **Presión del gas producido**

Una vez que las muestras se hubieron fermentado en los botes respectivos dentro del baño térmico, la presión generada por la producción de gas se obtuvo mediante el siguiente proceso operativo.

- Verificar que la temperatura del baño térmico fuera la correcta.
- Verificar que todas las válvulas primarias y secundarias de los fermentadores estuvieran cerradas, luego abrir las válvulas de paso de nitrógeno y despresurización.
- Activar el multímetro.
- Abrir la válvula del tanque de nitrógeno, para purgar el aire de los conductos. Asegurarse de que el flujo produzca una presión interna menor a la que equivale a 5.000 V en el multímetro.
- Cerrar las válvulas de paso de nitrógeno y despresurización. Esto permitió que al interior de la red hubiera sólo nitrógeno a una presión superior a la atmosférica.
- Abrir la válvula secundaria del primer fermentador al cual se iba a medir la presión.
- Abrir la válvula de despresurización, lentamente, hasta llegar a una lectura de 3.200 V en el multímetro, ya que esta presión correspondió a la presión de referencia.
- Abrir la válvula primaria del fermentador y verificar que el valor de la lectura en el

multímetro no disminuyera, para asegurar ausencia de fugas.

- Anotar en la bitácora el valor medio consignado en el multímetro, así como la fecha y hora en que se tomó la medida.
- Cerrar las válvulas primaria y secundaria del fermentador.
- Efectuar los cuatro pasos anteriores, en la secuencia descrita, para cada uno de los demás fermentadores.
- Una vez terminadas las lecturas de presión y las correspondientes inyecciones de gas al cromatógrafo, desconectar los fermentadores, sacarlos del baño térmico y desechar las muestras para proceder a una nueva fermentación.

**Tabla 1. Lugares donde se colectaron muestras de estiércol**

<b>Localidad</b>	<b>Municipio</b>	<b>Estado</b>	<b>Clima</b>
San Gabriel, Las Palmas	Amacuzac	Morelos	Cálido
Cuautla	Cuautla	Morelos	Cálido
El Terrón	Huajitlán	Morelos	Cálido
Jantetelco	Jantetelco	Morelos	Cálido
Puente de Ixtla	Puente de Ixtla	Morelos	Cálido
Yecapixtla	Yecapixtla	Morelos	Cálido
Plano de las Papas	Angangueo	Michoacán	Frío
Mayorazgo	San Felipe del Progreso	México	Frío
La Providencia	San Felipe del Progreso	México	Frío
La Trinidad	San Felipe del Progreso	México	Frío
Santa Cruz del Rincón	San Felipe del Progreso	México	Frío
Sanoyos Buenavista	San Felipe del Progreso	México	Frío
Actopan	Actopan	Hidalgo	Templado
San Lorenzo	Apan	Hidalgo	Templado
Chimalpa	Apan	Hidalgo	Templado
Ixmiquilpan	Ixmiquilpan	Hidalgo	Templado
Pachuca	Pachuca	Hidalgo	Templado
Ciudad Sahagún	Sahagún	Hidalgo	Templado
Tizayuca	Tizayuca	Hidalgo	Templado
Tula	Tula	Hidalgo	Templado
Zimapán	Zimapán	Hidalgo	Templado
Tlaquepaque	Tlaquepaque	Jalisco	Templado
Tepetlixpa	Tepetlixpa	Morelos	Templado
Ajapusco	Ajapusco	México	Templado
Ajapusco	Ajapusco	México	Templado
San Miguel	Atepoxco	México	Templado
Atlatl	Atlatl	México	Templado
San Antonio Domingo	Axapusco	México	Templado
Santa María Maquixco	Axapusco	México	Templado
Chalco	Chalco	México	Templado
San Cristobal	San Cristobal	México	Templado
San Mateo Teopancala	San Mateo	México	Templado
La venta	Tepetlaoxtoc	México	Templado
San Mateo Tomás	Tepetlaoxtoc	México	Templado
Cuatro Milpas	Tepozotlán	México	Templado
El Tejocote	Texcoco	México	Templado
Coatlinchán	Texcoco	México	Templado
Texcoco	Texcoco	México	Templado
Tiacalco	Tiacalco	México	Templado
Coatitla	Tlalmanalco	México	Templado
Zumpango	Zumpango	México	Templado
Zumpango	Zumpango	México	Templado

**Continúa la Tabla 1. Lugares donde se colectaron muestras de estiércol**

<b>Localidad</b>	<b>Municipio</b>	<b>Estado</b>	<b>Clima</b>
Cadereíta	Cadereíta	Querétaro	Templado
Jala	Jala	Querétaro	Templado
Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	Querétaro	Templado
Querétaro	Querétaro	Querétaro	Templado
Apizaco	Apizaco	Tlaxcala	Templado
San Luis Apizaquito	Apizaco	Tlaxcala	Templado
Yeloz	Calpulalpan	Tlaxcala	Templado
San Mateo	Calpulalpan	Tlaxcala	Templado
San Cristóbal	Calpulalpan	Tlaxcala	Templado
Calpulalpan	Calpulalpan	Tlaxcala	Templado
San Felipe Sultepec	Calpulalpan	Tlaxcala	Templado
Benito Juárez	Huamantla	Tlaxcala	Templado
El Ampalme	Huamantla	Tlaxcala	Templado
Alzahaca	Huamantla	Tlaxcala	Templado
San Cristóbal	Huamantla	Tlaxcala	Templado
Hueyotlipan	Tlaxcala	Tlaxcala	Templado

Tabla 2. Análisis químico proximal de excretas de bovino

Sistema, función y clima	Materia Seca [%]	Proteína Cruda [%]	Extracto Etéreo [%]	Cenizas [%]	Fibra Fruda [%]	Extracto Libre de Nitrógeno [%]	Energía Digestible [kcal/kg]	Energía Metabolizable [kcal/kg]
ILT	14.48	2.00	0.26	3.31	4.20	4.71	369.18	302.69
ICT	15.43	2.28	0.30	4.41	3.26	5.18	379.71	311.33
ILT-LL	14.05	1.91	0.26	2.82	3.75	5.30	379.36	311.05
EDPT	16.58	1.73	0.52	5.52	4.00	4.80	382.22	313.39
ILCá	15.70	1.71	0.24	2.96	3.31	7.46	447.62	367.01
ICCá	26.03	4.06	0.62	3.74	8.75	8.85	733.94	601.77
S-ILCá	17.47	2.04	0.29	3.19	3.88	8.08	499.11	409.23
S-ICCá	16.63	2.01	0.33	2.47	3.35	8.46	506.09	414.95
EDPCá	15.94	1.93	0.30	3.34	4.24	6.14	427.24	350.30
<b>Promedio</b>	<b>16.92</b>	<b>2.19</b>	<b>0.35</b>	<b>3.53</b>	<b>4.30</b>	<b>6.55</b>	<b>458.27</b>	<b>375.75</b>

Donde: I = Intensivo; S-I = Semi-intensivo; E = Extensivo; L = Leche; C = Carne; DP = Doble propósito; LL = Lluvias; T = Templado; Cá = Cálido.

**Tabla 3. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, a 12 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
3.82	0.06	9.8E-02	92.17	1.7E-03	14.43
5.59	3.01	1.8E-01	48.96	3.2E-03	12.46
7.28	2.32	4.9E-01	18.58	8.4E-03	6.65
8.99	1.88	5.5E-01	16.49	9.5E-03	5.08
10.80	1.61	5.6E-01	16.24	9.6E-03	3.89
12.77	1.37	5.6E-01	16.19	9.6E-03	3.56
14.73	1.19	5.6E-01	16.19	9.6E-03	1.94

**Tabla 4. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, a 12 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
3.83	0.04	7.0E-02	74.00	1.2E-03	22.47
5.61	2.79	9.4E-02	54.70	1.6E-03	12.78
7.31	2.16	1.3E-01	39.91	2.2E-03	9.25
9.05	1.76	1.6E-01	33.17	2.7E-03	8.08
10.86	1.46	1.6E-01	31.79	2.8E-03	7.40
12.85	1.24	1.6E-01	31.27	2.8E-03	5.29
14.82	1.07	1.6E-01	31.27	2.8E-03	5.69

**Tabla 5. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, a 12 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
3.84	0.01	3.1E-02	90.44	5.1E-04	8.37
5.63	2.76	5.2E-02	54.43	8.4E-04	8.62
7.34	2.20	6.4E-02	44.21	1.0E-03	10.22
9.09	1.79	8.1E-02	35.05	1.3E-03	13.90
10.91	1.49	8.2E-02	34.62	1.3E-03	11.38

**Tabla 6. Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 12 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
3.84	0.11	1.0E-02	37.66	1.5E-04	16.03
5.72	4.00	1.4E-02	27.52	2.1E-04	14.50
7.44	3.09	1.4E-02	27.41	2.1E-04	1.19
9.19	2.52	1.4E-02	27.41	2.1E-04	0.97
11.02	2.10	1.4E-02	27.41	2.1E-04	0.61

**Tabla 7. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabilado, a 17 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.65	0.02	1.2E-01	114.66	2.0E-03	11.18
3.33	0.00	5.3E-01	24.92	9.2E-03	12.35
5.35	0.05	6.0E-01	22.03	1.0E-02	3.61
8.87	0.05	7.4E-01	17.89	1.3E-02	2.78
12.77	0.04	7.4E-01	17.84	1.3E-02	3.75

**Tabla 8. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, a 17 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.67	0.00	4.2E-01	201.54	6.8E-03	17.01
3.36	0.01	7.0E-01	120.82	1.1E-02	11.53
5.40	0.03	1.2E+00	72.19	1.9E-02	13.71
8.94	0.01	2.6E+00	31.84	4.3E-02	15.38
12.86	0.00	2.7E+00	30.80	4.4E-02	15.67

**Tabla 9. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabilado, a 17 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.68	0.02	4.8E-01	78.40	8.3E-03	11.75
3.39	0.02	8.5E-01	44.48	1.5E-02	8.82
5.44	0.03	1.3E+00	29.72	2.2E-02	7.63
8.99	0.02	2.0E+00	18.51	3.5E-02	5.83
12.91	0.01	2.1E+00	17.84	3.6E-02	6.81

**Tabla 10. Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 17 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.69	0.00	6.9E-02	139.32	1.0E-03	11.60
3.50	2.53	1.8E-01	54.11	2.7E-03	11.74
5.55	1.61	3.1E-01	30.71	4.7E-03	13.20
9.12	0.97	3.6E-01	26.80	5.4E-03	8.08
13.04	0.68	3.6E-01	26.55	5.4E-03	15.39

**Tabla 11. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, a 21 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre		Incertidumbre		Incertidumbre	
	Tiempo [%]	CH4 [mg]	CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	CH4/masa [%]	
1.08	8.07	2.1E-01	64.95	2.0E-03	17.64	
2.09	5.28	3.8E-01	15.19	8.5E-03	6.00	
3.93	0.70	5.5E-02	13.66	9.5E-03	2.79	
5.06	1.28	1.2E-02	13.38	9.7E-03	0.76	
6.04	1.45	2.1E-02	12.90	1.0E-02	2.36	

**Tabla 12. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, a 21 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre		Incertidumbre		Incertidumbre	
	Tiempo [%]	CH4 [mg]	CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	CH4/masa [%]	
1.09	8.89	1.6E-01	40.49	2.8E-03	8.28	
2.10	6.11	6.6E-01	10.07	1.1E-02	3.27	
3.94	0.41	7.6E-01	8.75	1.3E-02	1.95	
5.06	1.40	8.4E-01	7.92	1.5E-02	1.31	
6.04	1.58	8.5E-01	7.79	1.5E-02	1.53	

**Tabla 13. Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 21 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre		Incertidumbre		Incertidumbre	
	Tiempo [%]	CH4 [mg]	CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	CH4/masa [%]	
1.10	9.73	2.1E-01	30.43	3.2E-03	8.05	
2.16	4.65	6.8E-01	9.47	1.0E-02	3.22	
3.99	1.23	8.8E-01	7.27	1.3E-02	2.41	
5.12	0.63	9.1E-01	7.02	1.4E-02	0.97	
6.09	0.90	9.3E-01	6.89	1.4E-02	1.40	

**Tabla 14. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, a 22 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.69	0.00	3.6E-01	123.09	6.2E-03	28.27
3.57	0.29	1.7E+00	26.77	2.9E-02	7.87
5.23	0.20	1.8E+00	24.03	3.2E-02	6.84
7.03	0.15	1.9E+00	23.84	3.2E-02	5.87
9.07	0.12	1.9E+00	23.84	3.2E-02	3.83

**Tabla 15. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, a 22 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.70	0.00	1.9E+00	104.05	3.2E-02	16.33
3.60	0.00	6.5E+00	31.09	1.1E-01	9.31
5.28	0.01	8.1E+00	24.98	1.3E-01	8.09
7.08	0.00	8.5E+00	23.85	1.4E-01	9.02
9.13	0.01	8.5E+00	23.85	1.4E-01	5.77

**Tabla 16. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, a 22 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.76	2.49	3.0E-01	166.71	5.2E-03	25.58
3.67	1.19	1.4E+00	34.33	2.5E-02	10.70
5.36	0.83	1.7E+00	29.81	2.9E-02	8.31
7.17	0.62	1.7E+00	29.42	2.9E-02	8.55
9.22	0.49	1.7E+00	29.42	2.9E-02	8.97

**Tabla 17. Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 22 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.72	0.04	1.0E-01	78.31	1.5E-03	10.38
3.65	0.02	6.8E-01	11.72	1.0E-02	4.19
5.35	0.01	7.7E-01	10.34	1.2E-02	2.94
7.27	1.40	7.7E-01	10.34	1.2E-02	4.29

**Tabla 18. Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 27 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.74	2.59	8.2E-01	56.49	1.3E-02	22.08
2.56	3.11	1.5E+00	30.97	2.4E-02	10.60
4.46	2.67	3.0E+00	15.40	4.7E-02	6.84
6.12	2.47	3.4E+00	13.53	5.4E-02	5.22
7.22	2.39	3.4E+00	13.50	5.4E-02	2.63
8.88	2.09	3.4E+00	13.50	5.4E-02	4.36
9.82	1.99	3.4E+00	13.50	5.4E-02	2.69
10.84	1.99	3.4E+00	13.50	5.4E-02	1.48

**Tabla 19. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, a 27 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.76	2.02	4.0E+00	49.94	5.8E-02	18.24
2.58	2.43	5.2E+00	39.04	7.4E-02	12.40
4.48	2.09	6.1E+00	33.08	8.7E-02	26.48
6.16	1.99	6.1E+00	33.08	8.7E-02	22.47
7.24	2.23	6.1E+00	33.08	8.7E-02	7.40
8.90	1.88	6.1E+00	33.07	8.7E-02	6.32
9.85	1.75	6.1E+00	33.07	8.7E-02	0.34
10.87	1.78	6.1E+00	33.06	8.7E-02	1.28

**Tabla 20. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima cálido, a 27 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.76	1.57	3.7E-01	21.87	3.6E-03	14.32
2.59	1.92	4.3E-01	18.97	4.1E-03	6.70
4.49	1.88	5.1E-01	15.90	4.9E-03	5.96
6.18	1.62	5.1E-01	15.90	4.9E-03	2.63
7.26	1.86	5.1E-01	15.90	4.9E-03	2.57

**Tabla 21. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima templado, a 27 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.77	1.06	1.2E+01	15.05	2.0E-01	5.41
2.60	1.47	1.6E+01	11.29	2.6E-01	3.17
4.51	1.42	1.7E+01	10.56	2.8E-01	3.41
6.20	1.28	1.7E+01	10.56	2.8E-01	2.22
7.28	1.56	1.7E+01	10.56	2.8E-01	0.46

**Tabla 22. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, en clima templado, a 27 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.77	0.90	6.6E-01	35.45	1.1E-02	8.30
2.60	1.24	1.3E+00	17.43	2.3E-02	4.04
4.52	1.32	2.9E+00	8.11	5.0E-02	4.63
6.21	1.20	2.9E+00	7.97	5.1E-02	1.94
7.29	1.45	2.9E+00	7.97	5.1E-02	0.18

**Tabla 23. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, en clima cálido, a 27 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.78	0.79	7.5E-01	53.00	1.2E-02	14.51
2.61	1.00	1.3E+00	30.67	2.1E-02	8.41
4.53	1.13	1.9E+00	21.39	3.0E-02	8.65
6.21	1.10	1.9E+00	21.27	3.0E-02	6.58
7.30	1.33	1.9E+00	21.27	3.0E-02	4.03

**Tabla 24. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, en clima templado, a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
0.91	11.40	1.2E+00	92.38	2.1E-02	19.75
1.76	5.87	2.6E+00	43.23	4.6E-02	8.89
2.60	3.95	4.2E+00	26.91	7.3E-02	6.93
3.39	3.06	5.0E+00	22.93	8.6E-02	5.85
4.67	12.97	5.2E+00	21.82	9.0E-02	8.26

**Tabla 25. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima templado, a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
0.92	10.47	1.4E+00	40.58	2.3E-02	8.28
1.78	5.40	1.7E+00	34.11	2.8E-02	7.87
2.62	3.67	1.8E+00	33.58	2.8E-02	9.95
3.42	2.83	1.8E+00	33.58	2.8E-02	10.81

**Tabla 26. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima cálido, a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
0.92	10.19	3.8E+00	3.71	3.6E-02	2.06
1.78	5.26	6.1E+00	2.29	5.9E-02	0.76
2.63	3.55	6.1E+00	2.29	5.9E-02	0.55
3.43	2.73	6.1E+00	2.29	5.9E-02	0.67

**Tabla 27. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, clima templado, a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
0.92	9.52	1.1E+00	21.33	1.9E-02	5.21
1.78	4.94	3.2E+00	7.41	5.4E-02	1.71
2.64	3.33	3.8E+00	6.23	6.5E-02	1.71
3.44	2.55	3.8E+00	6.19	6.5E-02	2.00
5.23	1.68	3.8E+00	6.18	6.5E-02	3.30

**Tabla 28. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, en clima cálido, a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
0.93	9.23	1.8E+00	29.35	2.6E-02	7.57
1.78	4.79	2.6E+00	20.13	3.7E-02	5.84
2.65	3.24	3.0E+00	17.66	4.3E-02	6.20
3.46	2.48	3.2E+00	16.58	4.5E-02	5.26
5.25	1.64	3.2E+00	16.45	4.6E-02	7.19

**Tabla 29. Emisiones de metano por bovinos de engorda, semi-intensivo, en clima cálido, a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
0.93	8.98	4.6E+00	10.50	7.0E-02	2.75
1.79	4.66	5.1E+00	9.62	7.6E-02	2.10
2.67	3.12	5.5E+00	8.94	8.2E-02	2.98
3.48	2.39	5.5E+00	8.94	8.2E-02	2.32

**Tabla 30. Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
0.93	8.83	2.2E+00	41.54	3.4E-02	10.76
1.80	4.51	3.5E+00	25.73	5.5E-02	6.48
2.68	2.95	4.0E+00	22.60	6.3E-02	8.07
3.49	2.27	4.0E+00	22.60	6.3E-02	5.84

**Tabla 31. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima cálido. Lag. ana., a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.79	0.00	2.3E+00	43.61	9.0E-02	11.37
3.80	0.01	4.4E+00	33.22	1.7E-01	8.66
6.81	0.00	5.9E+00	29.18	2.3E-01	7.61
8.92	0.00	7.0E+00	27.48	2.7E-01	7.17
11.75	0.00	7.7E+00	26.59	3.0E-01	6.93
14.81	0.00	8.1E+00	26.18	3.1E-01	6.83
17.21	2.91	8.3E+00	26.07	3.2E-01	6.80

**Tabla 32. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero semi-estabulado, clima temp. Lag. ana., a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.79	0.03	1.5E+00	79.94	8.4E-02	13.97
3.80	0.00	3.7E+00	49.43	2.1E-01	8.64
6.81	0.00	6.2E+00	37.31	3.5E-01	6.53
8.92	0.00	8.0E+00	33.33	4.6E-01	5.83
11.75	0.00	9.0E+00	32.28	5.2E-01	5.65
14.81	0.00	1.0E+01	30.06	5.9E-01	5.26
17.21	2.91	1.1E+01	29.27	6.2E-01	5.12

**Tabla 33. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda, en clima templado. Lag. ana., a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre Tiempo [%]	CH4 [mg]	Incertidumbre CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	Incertidumbre CH4/masa [%]
1.80	0.00	3.7E+00	42.71	1.4E-01	11.13
3.81	0.00	7.1E+00	35.11	2.7E-01	9.15
6.82	0.00	9.1E+00	32.13	3.5E-01	8.38
8.93	0.00	9.9E+00	31.79	3.8E-01	8.29
11.76	0.00	1.1E+01	30.46	4.2E-01	7.94
14.83	0.00	1.2E+01	29.38	4.4E-01	7.66
17.22	2.90	1.2E+01	29.24	4.5E-01	7.62

**Tabla 34. Emisiones de metano por excretas de bovino de engorda. Alim. Esp. Clima temp. Lag. ana., a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre		Incertidumbre		Incertidumbre	
	Tiempo [%]	CH4 [mg]	CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	CH4/masa [%]	
1.81	0.00	7.9E-01	164.01	3.0E-02	42.71	
3.81	0.01	3.0E+00	76.88	1.2E-01	20.03	
6.82	0.01	9.8E+00	31.88	3.8E-01	8.31	
8.93	0.00	1.4E+01	27.30	5.3E-01	7.12	
11.76	0.00	1.7E+01	24.72	6.3E-01	6.45	
14.85	0.00	1.8E+01	23.31	7.1E-01	6.08	
17.22	2.90	1.9E+01	23.13	7.2E-01	6.03	

**Tabla 35. Emisiones de metano por excretas de bovino lechero estabulado, en clima temp. Lag. ana., a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre		Incertidumbre		Incertidumbre	
	Tiempo [%]	CH4 [mg]	CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	CH4/masa [%]	
1.82	0.00	6.8E+00	106.52	4.7E-01	15.43	
3.83	0.00	1.4E+01	69.70	1.0E+00	10.10	
6.84	0.00	3.2E+01	39.43	2.2E+00	5.72	
8.94	0.00	4.0E+01	34.64	2.7E+00	5.02	
11.77	0.00	4.9E+01	30.22	3.4E+00	4.38	
14.88	0.00	5.4E+01	28.26	3.7E+00	4.10	
17.24	2.90	5.5E+01	28.16	3.8E+00	4.08	

**Tabla 36. Emisiones de metano por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo. Lag. ana., a 35 C.**

Tiempo [d]	Incertidumbre		Incertidumbre		Incertidumbre	
	Tiempo [%]	CH4 [mg]	CH4 [%]	Ch4 / masa [mg/g]	CH4/masa [%]	
1.83	0.00	3.8E-01	562.76	2.4E-02	89.71	
3.84	0.00	1.6E+00	236.23	9.8E-02	37.66	
6.83	0.00	5.4E+00	87.82	3.4E-01	14.01	
8.95	0.00	7.6E+00	73.42	4.7E-01	11.71	
11.78	0.00	1.0E+01	59.13	6.5E-01	9.43	
14.86	0.00	1.2E+01	53.46	7.8E-01	8.53	
17.23	2.90	1.3E+01	52.44	8.1E-01	8.37	

Tabla 37. Factores de Emisión de Metano, en kg CH<sub>4</sub> / cabeza · año

Tipo	Sistema de producción y manejo de excretas			
	Lechero estabulado <sup>a</sup>	Semi-intensivo <sup>a,p</sup>	Engorda <sup>c</sup>	Extensivo DP <sup>p</sup>
F-12°C	1.78 x 10 <sup>-2</sup> ± 1.94%	3.01 x 10 <sup>-3</sup> ± 5.69%	8.96 x 10 <sup>-4</sup> ± 11.38%	1.53 x 10 <sup>-4</sup> ± 0.61%
T-17°C	2.37 x 10 <sup>-2</sup> ± 3.75%	3.85 x 10 <sup>-2</sup> ± 6.81%	6.22 x 10 <sup>-2</sup> ± 15.67%	3.44 x 10 <sup>-3</sup> ± 15.39%
T-21°C	1.86 x 10 <sup>-2</sup> ± 2.36%	1.56 x 10 <sup>-2</sup> ± 1.53%	ND	1.02 x 10 <sup>-2</sup> ± 1.40%
T-22°C	5.92 x 10 <sup>-2</sup> ± 3.83%	3.09 x 10 <sup>-2</sup> ± 8.97%	1.94 x 10 <sup>-1</sup> ± 5.77%	8.40 x 10 <sup>-3</sup> ± 4.29%
T-27°C	9.39 x 10 <sup>-2</sup> ± 0.18%	1.11 x 10 <sup>-1</sup> ± 1.28%	3.96 x 10 <sup>-1</sup> ± 0.46%	ND
C-27°C	5.14 x 10 <sup>-2</sup> ± 4.03%	ND	1.17 x 10 <sup>-2</sup> ± 2.57%	3.77 x 10 <sup>-2</sup> ± 1.48%
T-35°C	1.67 x 10 <sup>-1</sup> ± 8.26%	6.90 x 10 <sup>-2</sup> ± 3.30%	4.00 x 10 <sup>-2</sup> ± 10.81%	ND
C-35°C	ND	5.83 x 10 <sup>-2</sup> ± 7.19%	1.40 x 10 <sup>-1</sup> ± 0.67%	4.41 x 10 <sup>-2</sup> ± 5.84%
			9.96 x 10 <sup>-2</sup> ± 2.32% *	
Manejo en laguna anaeróbica				
Tipo	Lechero estabulado	Semi-intensivo	Engorda	Extensivo DP
T-35°C	7.05 ± 4.08%	7.87 x 10 <sup>-1</sup> ± 5.12%	1.07 ± 7.62%	5.68 x 10 <sup>-1</sup> ± 8.37%
			1.71 ± 6.03%	
C-35°C	ND	ND	7.56 x 10 <sup>-1</sup> ± 6.80%	ND
Donde:	* Sistema semi-intensivo de engorda de ganado en climas cálidos. F = Frío; T = Templado; C = Cálido; a = almacenamiento, c = corral; p = pastoreo; DP = Doble Propósito; ND = No hay Datos.			

Tabla 38. Emisiones de Metano, en m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV

Tipo	Sistema de producción y manejo de excretas			
	Lechero estabulado <sup>a</sup>	Semi-intensivo <sup>a,p</sup>	Engorda <sup>c</sup>	Extensivo DP <sup>p</sup>
F-12°C	4.27 x 10 <sup>-4</sup> ± 1.62%	1.26 x 10 <sup>-4</sup> ± 3.13%	6.34 x 10 <sup>-5</sup> ± 3.46%	1.08 x 10 <sup>-5</sup> ± 2.74%
T-17°C	5.68 x 10 <sup>-4</sup> ± 1.78%	1.61 x 10 <sup>-3</sup> ± 1.78%	2.12 x 10 <sup>-3</sup> ± 3.08%	2.78 x 10 <sup>-4</sup> ± 2.66%
T-21°C	4.45 x 10 <sup>-4</sup> ± 1.29%	6.53 x 10 <sup>-4</sup> ± 0.78%	ND	7.17 x 10 <sup>-4</sup> ± 0.69%
T-22°C	1.42 x 10 <sup>-3</sup> ± 2.38%	1.29 x 10 <sup>-3</sup> ± 2.94%	6.58 x 10 <sup>-3</sup> ± 2.39%	5.92 x 10 <sup>-4</sup> ± 1.03%
T-27°C	2.25 x 10 <sup>-3</sup> ± 0.80%	4.65 x 10 <sup>-3</sup> ± 3.31%	1.35 x 10 <sup>-2</sup> ± 1.06%	ND
C-27°C	1.12 x 10 <sup>-3</sup> ± 2.13%	ND	1.97 x 10 <sup>-4</sup> ± 1.59%	2.66 x 10 <sup>-3</sup> ± 1.35%
T-35°C	4.00 x 10 <sup>-3</sup> ± 2.18%	2.89 x 10 <sup>-3</sup> ± 0.62%	1.36 x 10 <sup>-3</sup> ± 3.36%	ND
C-35°C	ND	1.91 x 10 <sup>-3</sup> ± 1.65%	2.35 x 10 <sup>-3</sup> ± 0.23%	2.73 x 10 <sup>-2</sup> ± 2.26%
			3.29 x 10 <sup>-3</sup> ± 0.89% *	
Manejo en laguna anaeróbica				
Tipo	Lechero estabulado	Semi-intensivo	Engorda	Extensivo DP
T-35°C	1.69 x 10 <sup>-1</sup> ± 2.82%	3.30 x 10 <sup>-2</sup> ± 2.93%	3.65 x 10 <sup>-2</sup> ± 2.92%	4.01 x 10 <sup>-2</sup> ± 5.24%
			5.80 x 10 <sup>-2</sup> ± 2.31%	
C-35°C	ND	ND	1.27 x 10 <sup>-2</sup> ± 2.61%	ND
Donde:	* Sistema semi-intensivo de engorda de ganado en climas cálidos. F = Frío; T = Templado; C = Cálido; a = almacenamiento, c = corral; p = pastoreo; DP = Doble Propósito; ND = No hay Datos.			

Tabla 39. Factores de Conversión de Metano (FCM), en %.

Tipo	Sistema de producción y manejo de excretas			
	Lechero estabulado <sup>a</sup>	Semi-intensivo <sup>a,p</sup>	Engorda <sup>c</sup>	Extensivo DP <sup>p</sup>
F-12°C	0.23	0.34	0.10	0.02
T-17°C	0.30	4.40	3.28	0.62
T-21°C	0.24	1.78	ND	1.61
T-22°C	0.76	3.53	10.22	1.33
T-27°C	1.20	12.69	20.89	ND
C-27°C	0.60	ND	0.31	5.98
T-35°C	2.13	7.89	2.11	ND
C-35°C	ND	5.21	3.65	6.13
			5.11*	
Manejo en laguna anaeróbica				
Tipo	Lechero estabulado	Semi-intensivo	Engorda	Extensivo DP
T-35°C	90.00	90.00	56.68	90.00
			90.00	
C-35°C	ND	ND	19.72	ND
Donde:	* Sistema semi-intensivo de engorda de ganado en climas cálidos. F = Frío; T = Templado; C = Cálido; a = almacenamiento, c = corral; p = pastoreo; DP = Doble Propósito; ND = No hay Datos.			

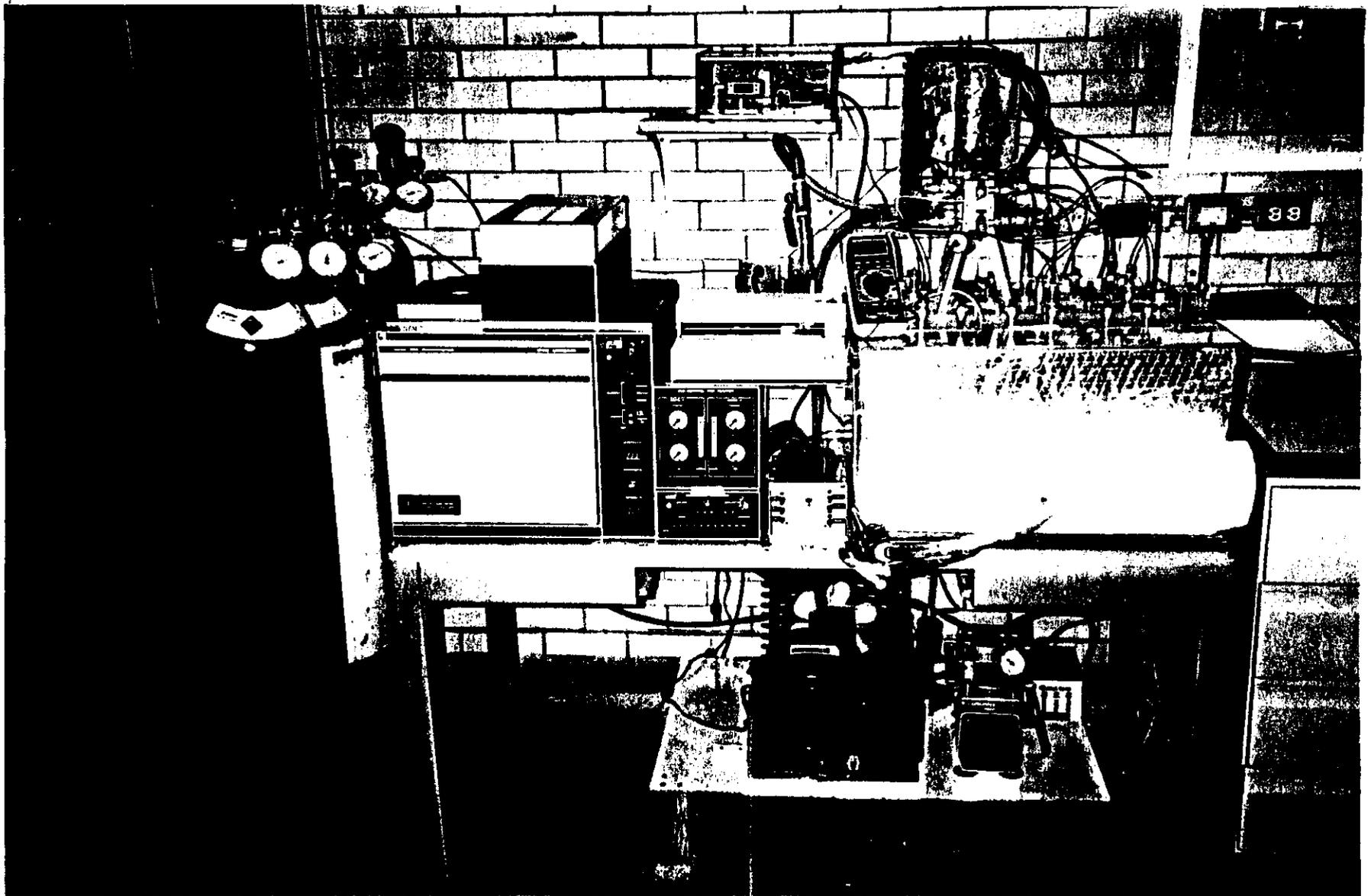


Figura 1. Dispositivo experimental de fermentación

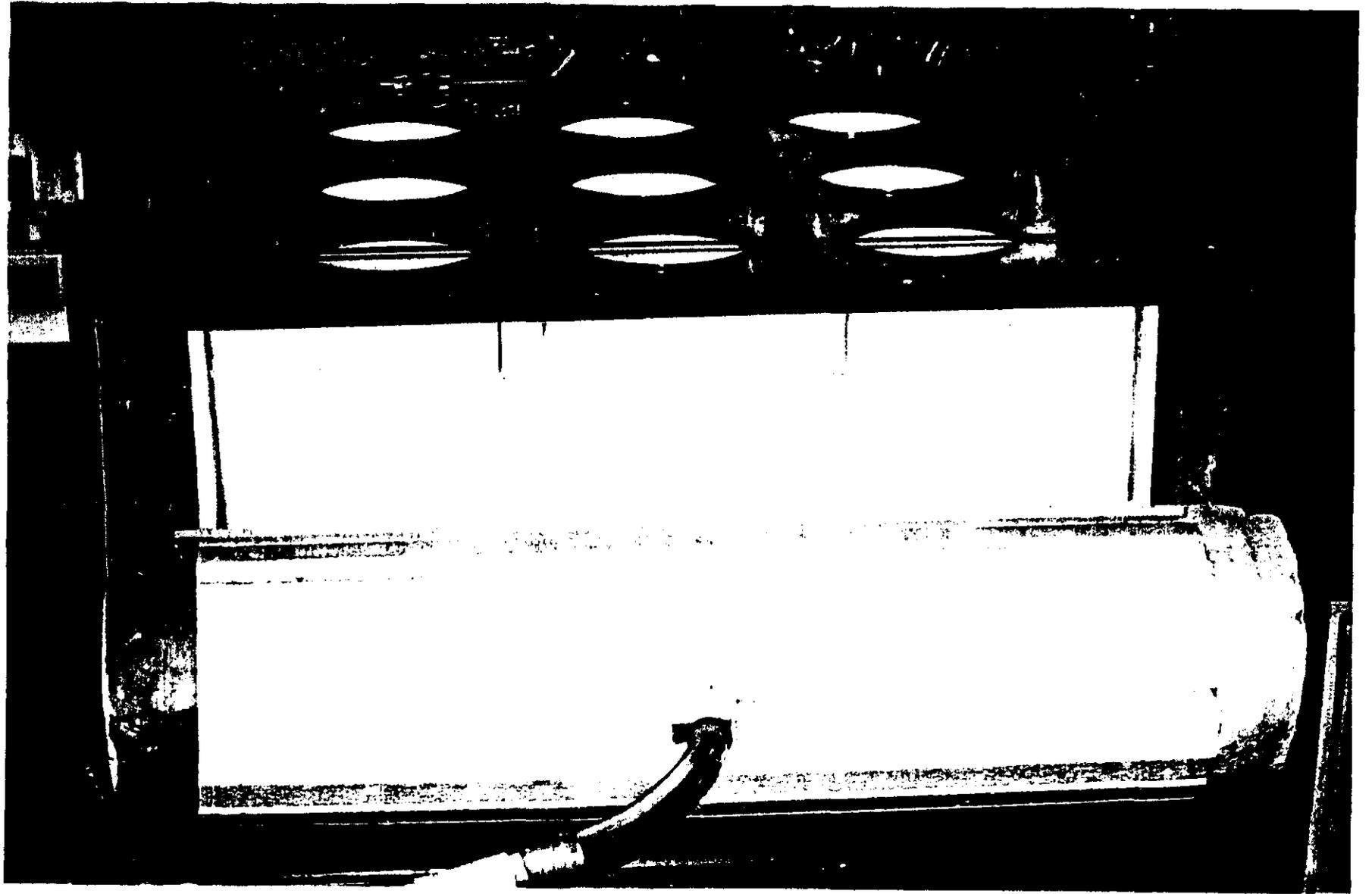


Figura 2. Baño Térmico

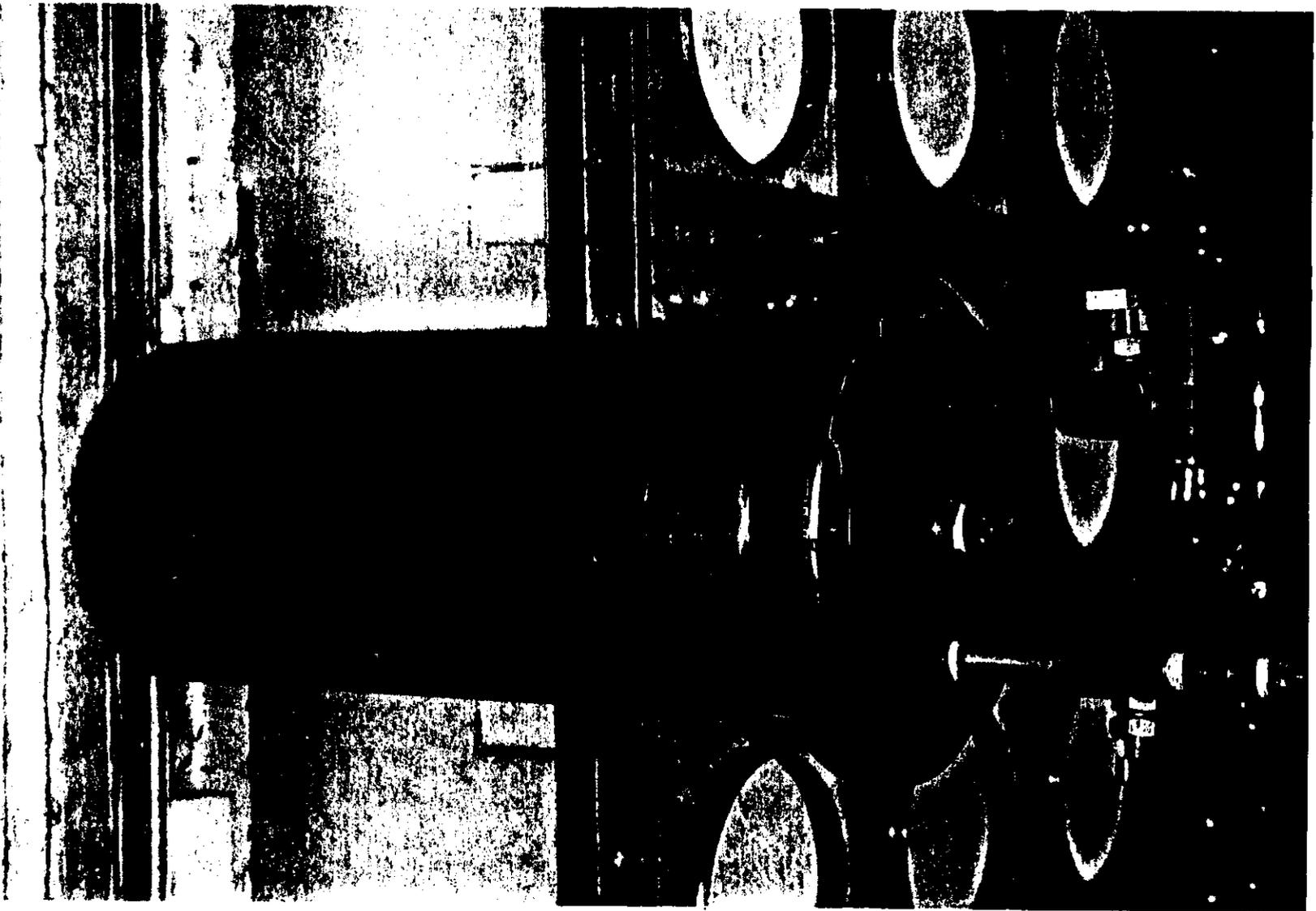
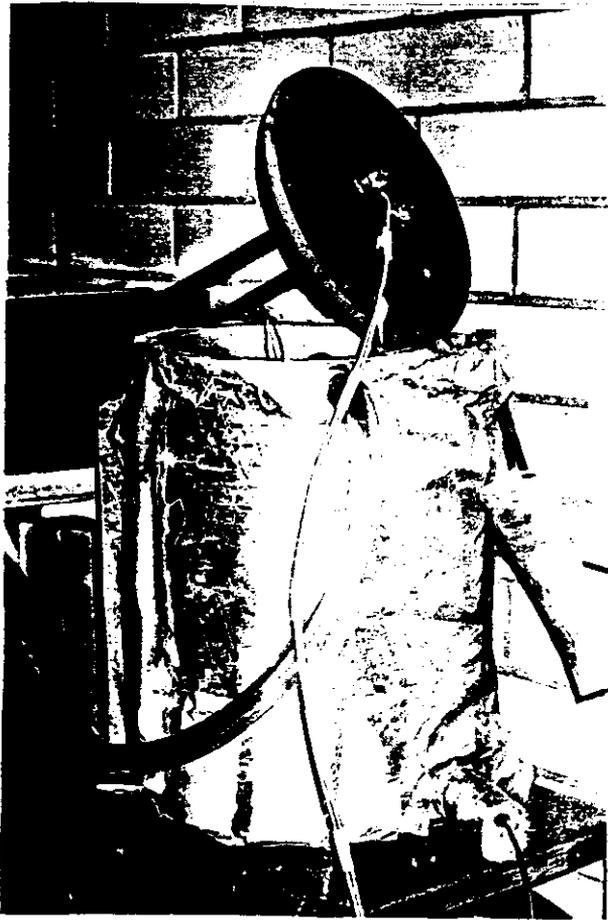
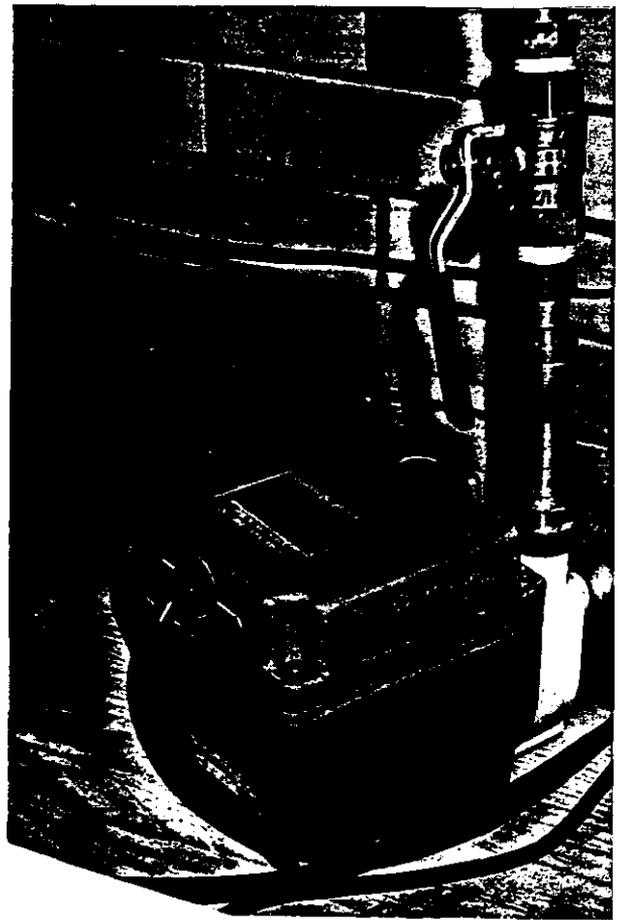


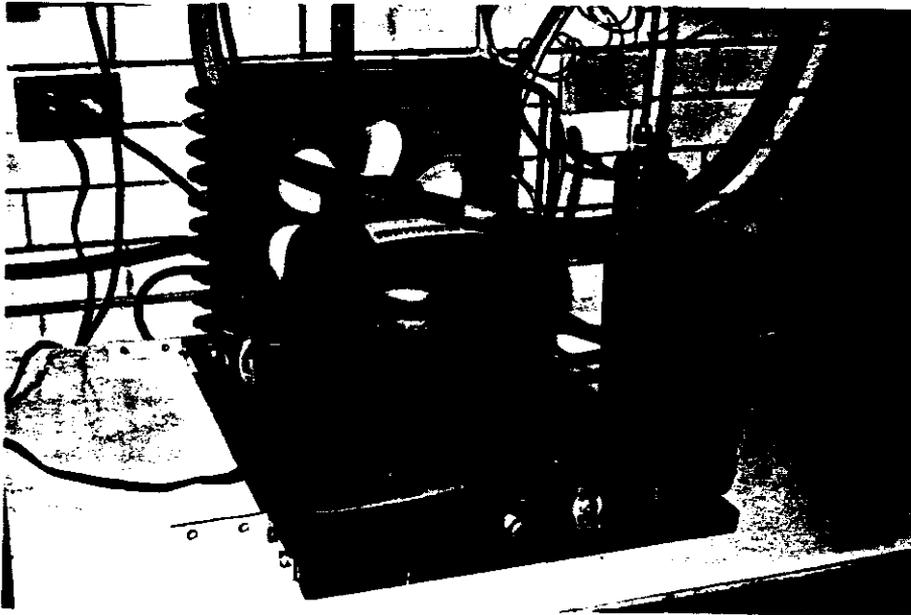
Figura 3. Contenedor con Tapa



[A]



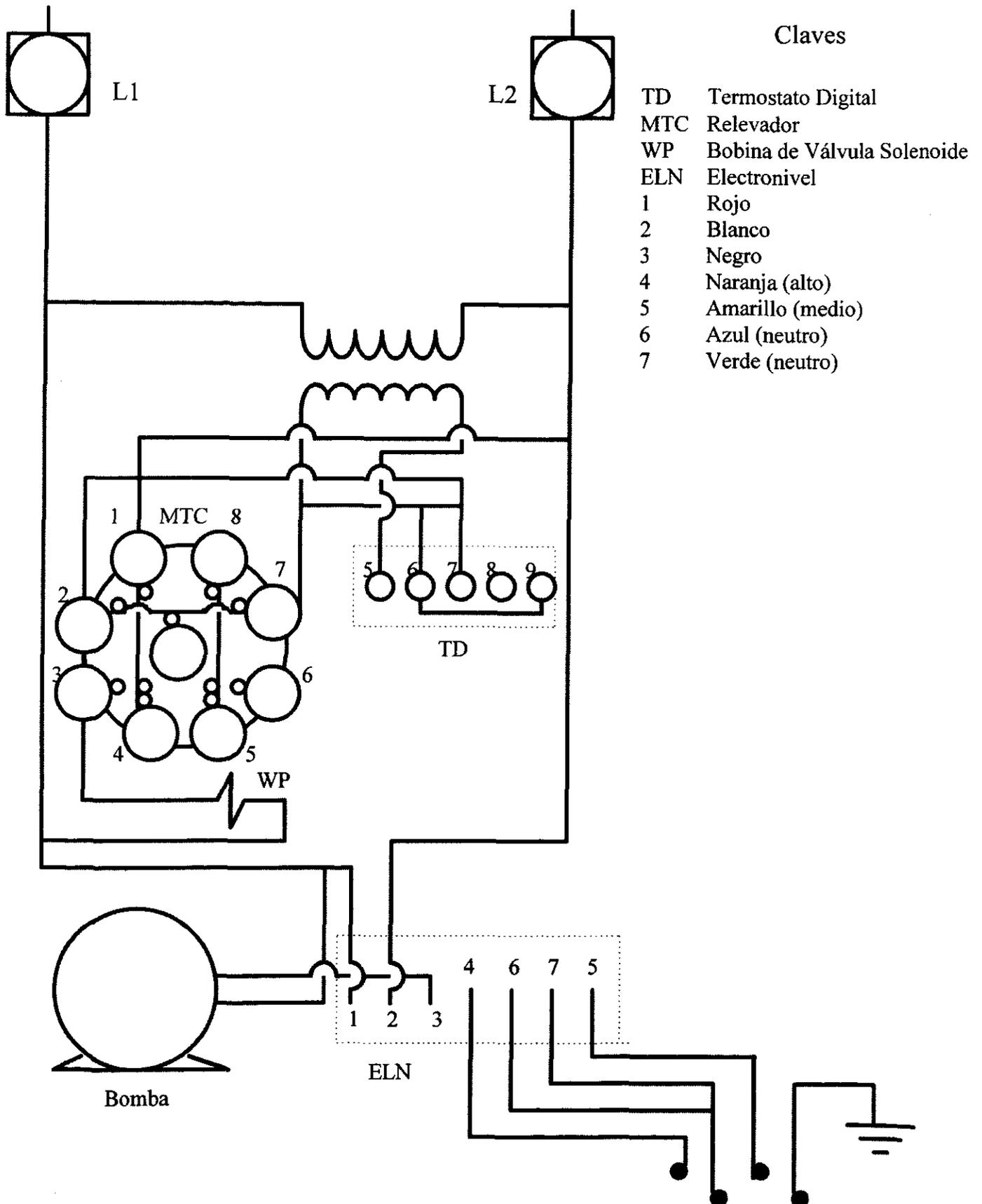
[B]



[C]

Figura 4. [A] Depósito y Resistencia. [B] Bomba de Agua. [C] Unidad de Enfriamiento

**Figura 5. Circuito para el Control de Temperatura**



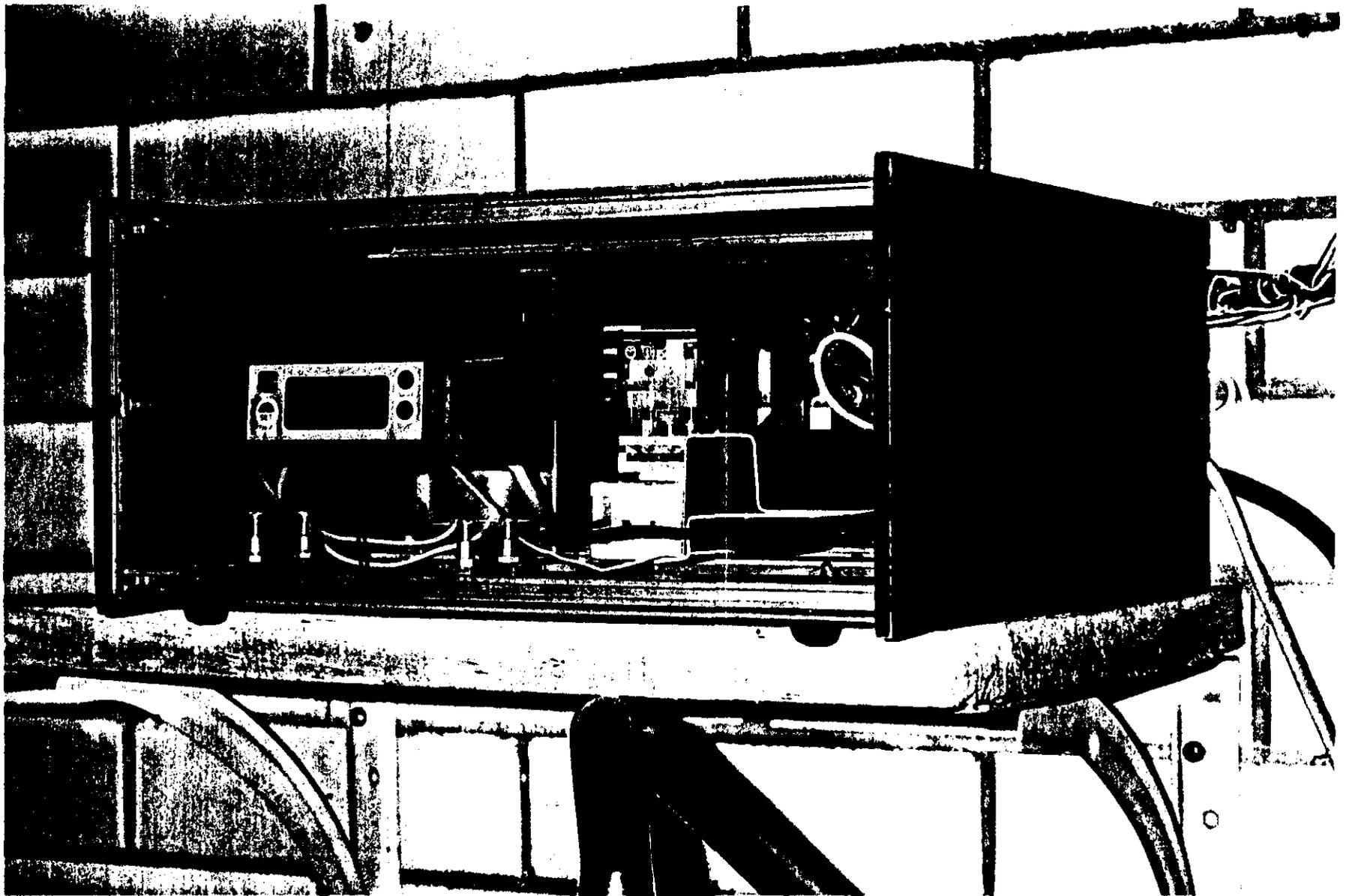


Figura 6. Dispositivo para el control de temperatura

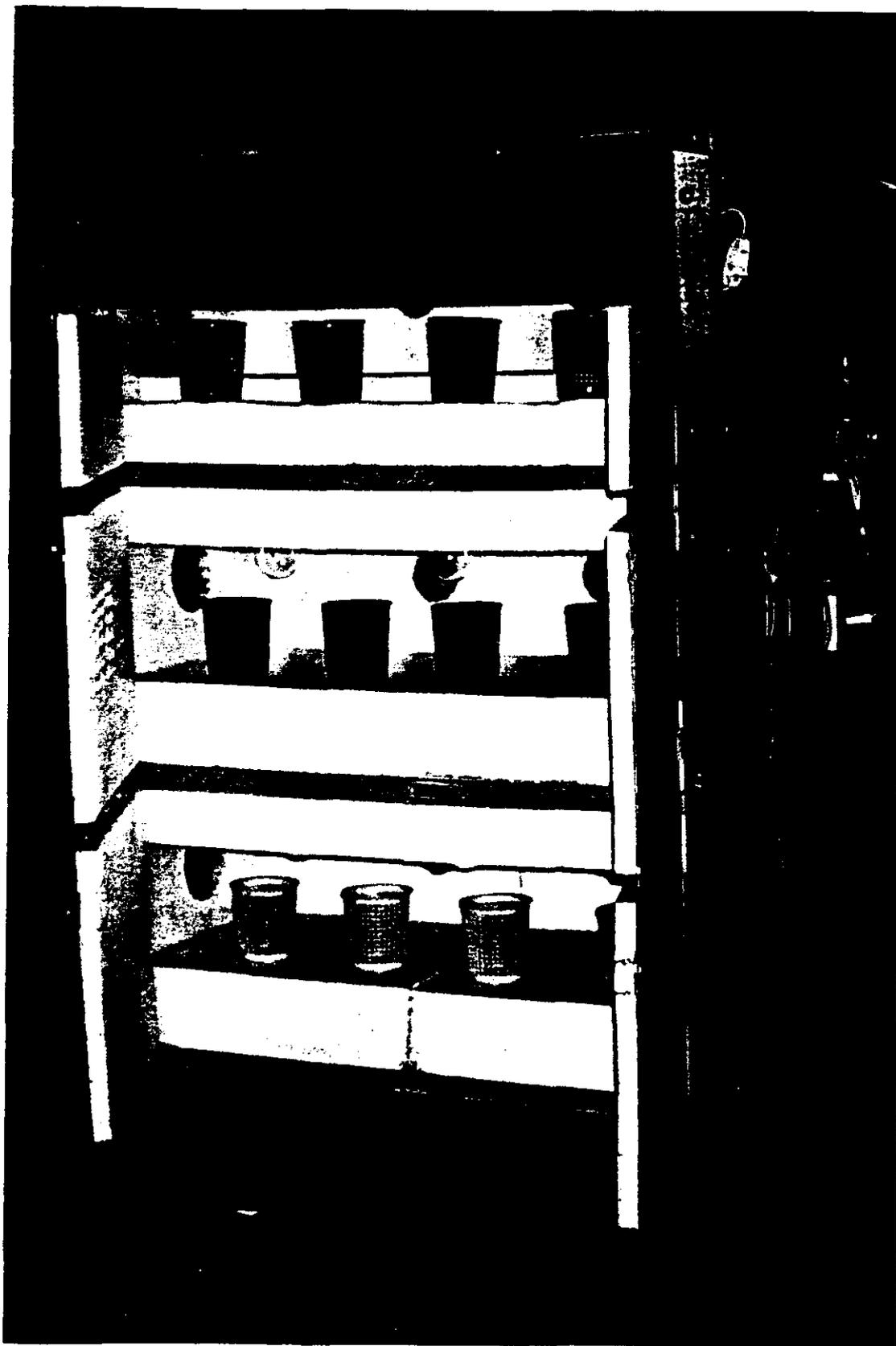
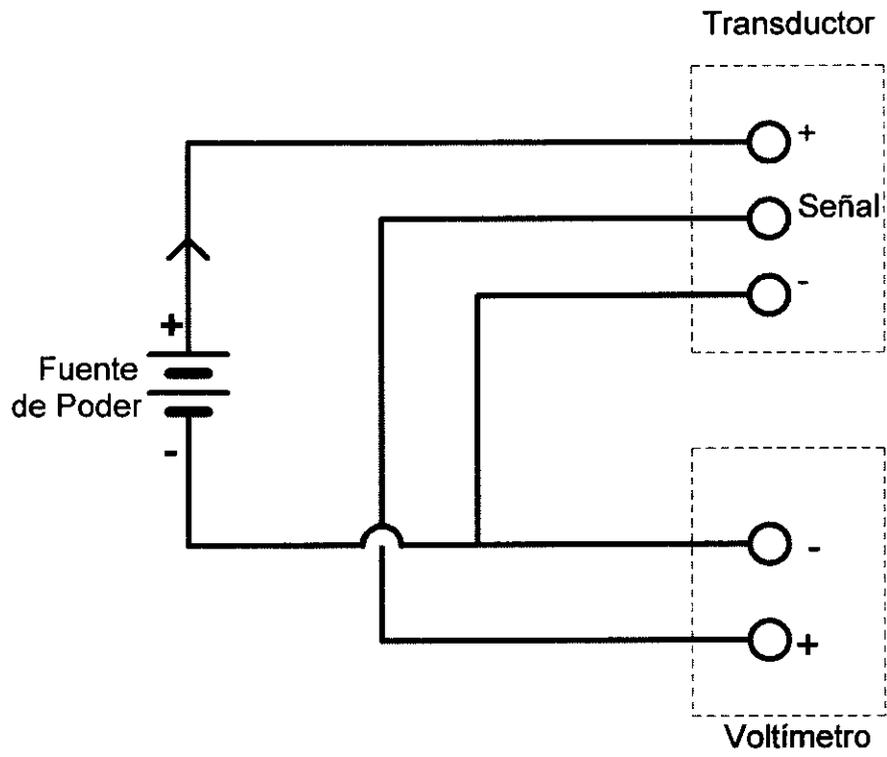
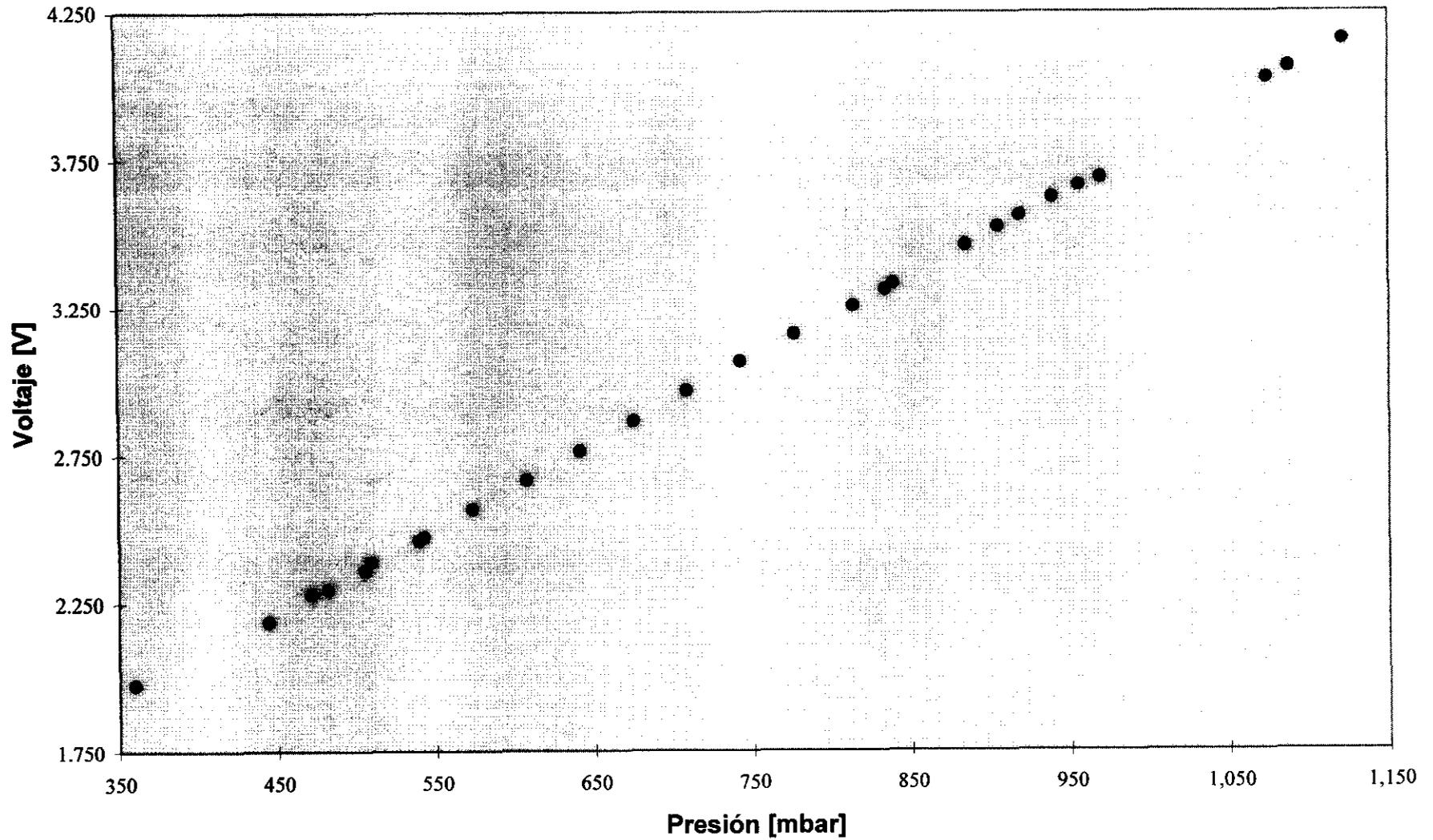


Figura 7. Secador

**Figura 8. Circuito para el registro de la presión producida**



**Figura 9. Relación entre presión y voltaje utilizando transductor y manómetro**



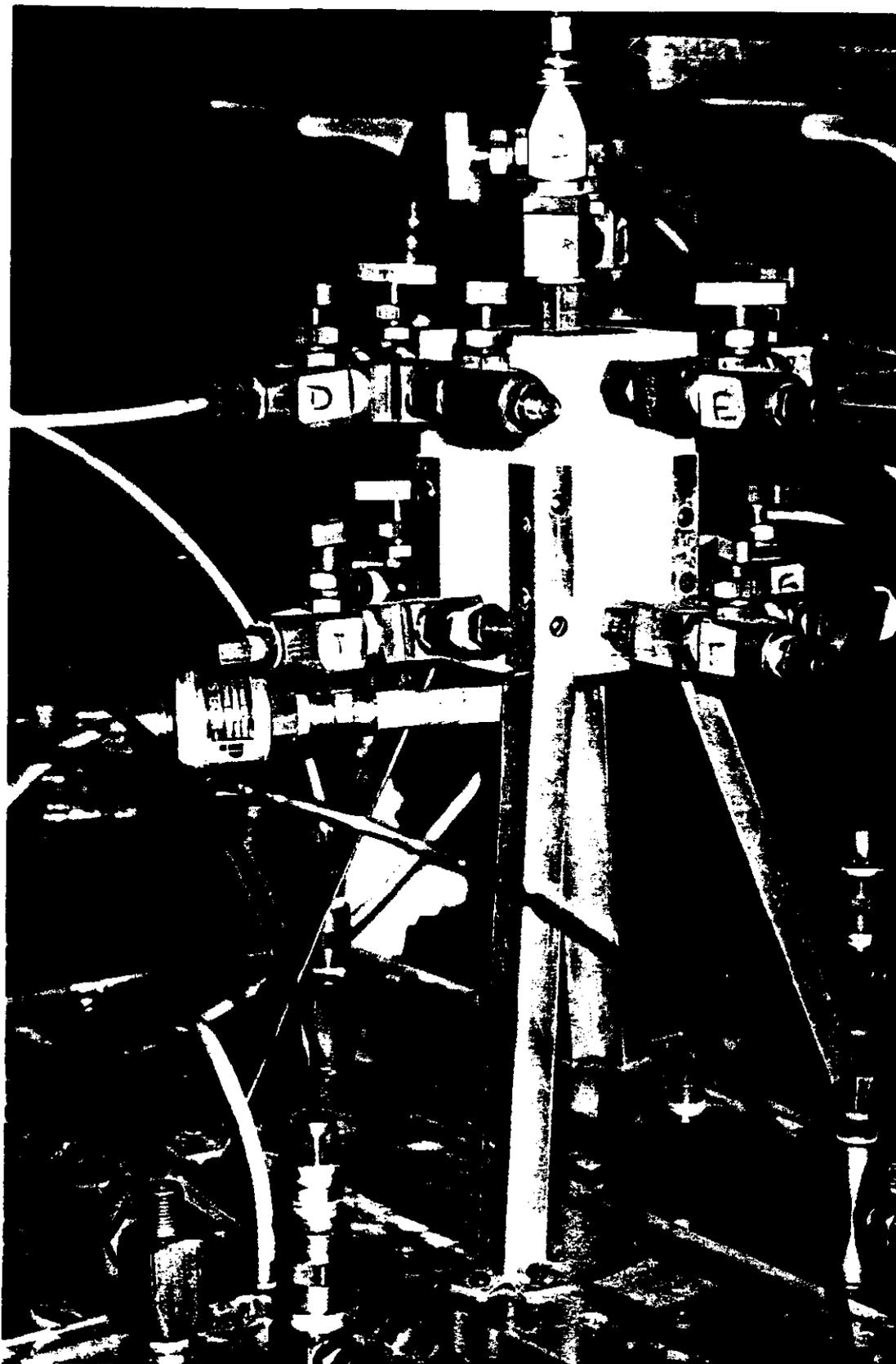


Figura 10. Red de Conductos

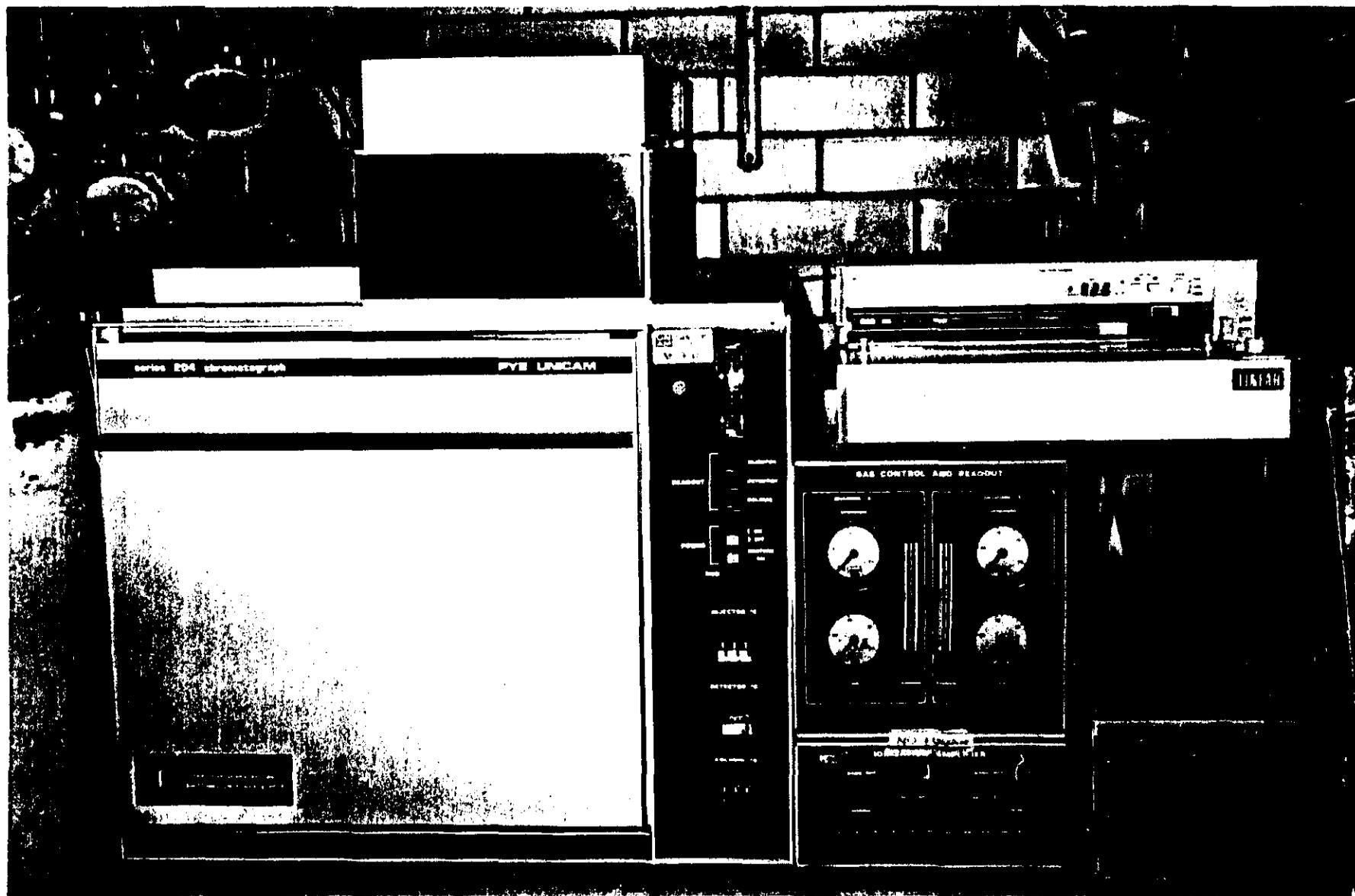
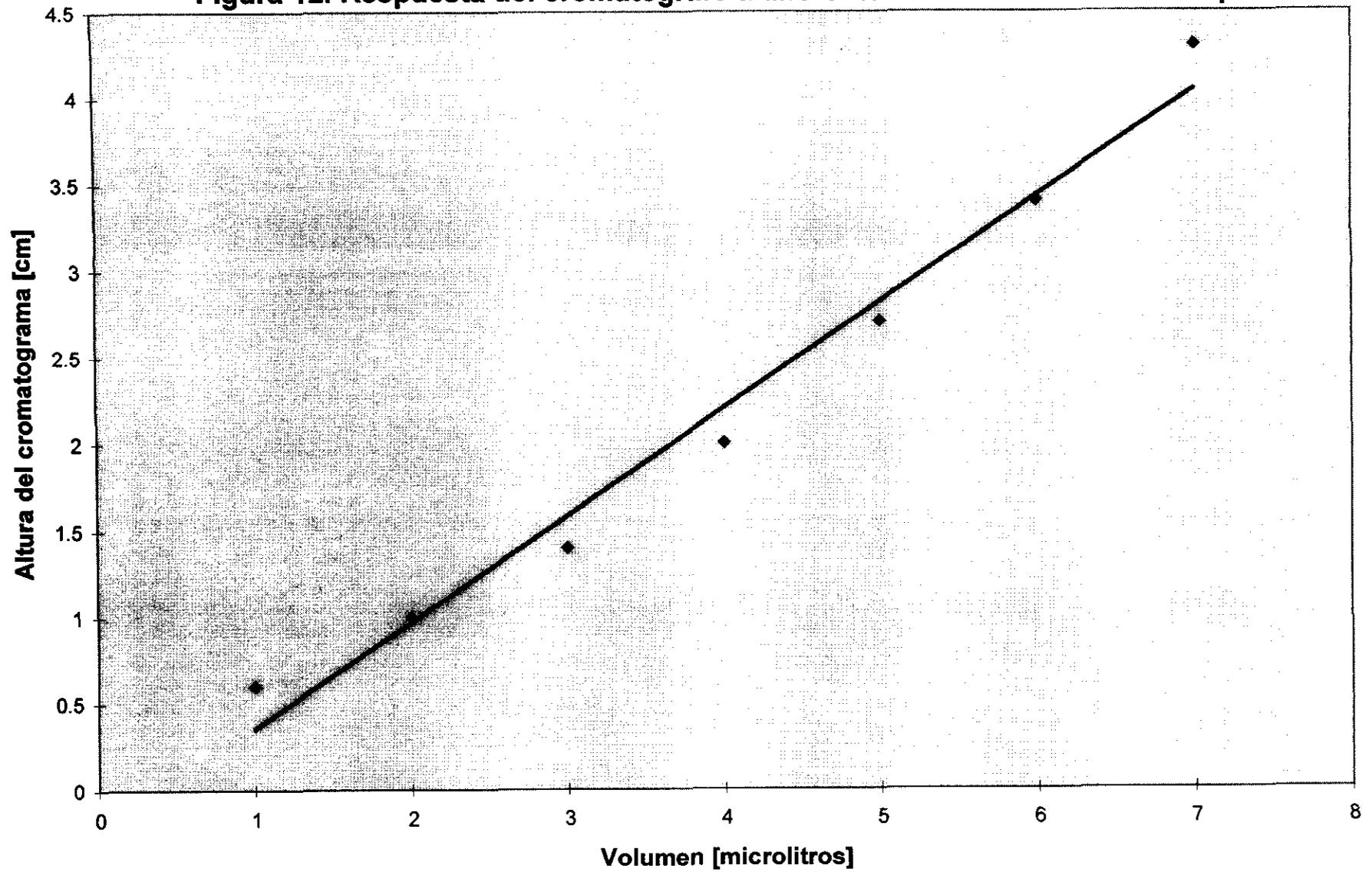
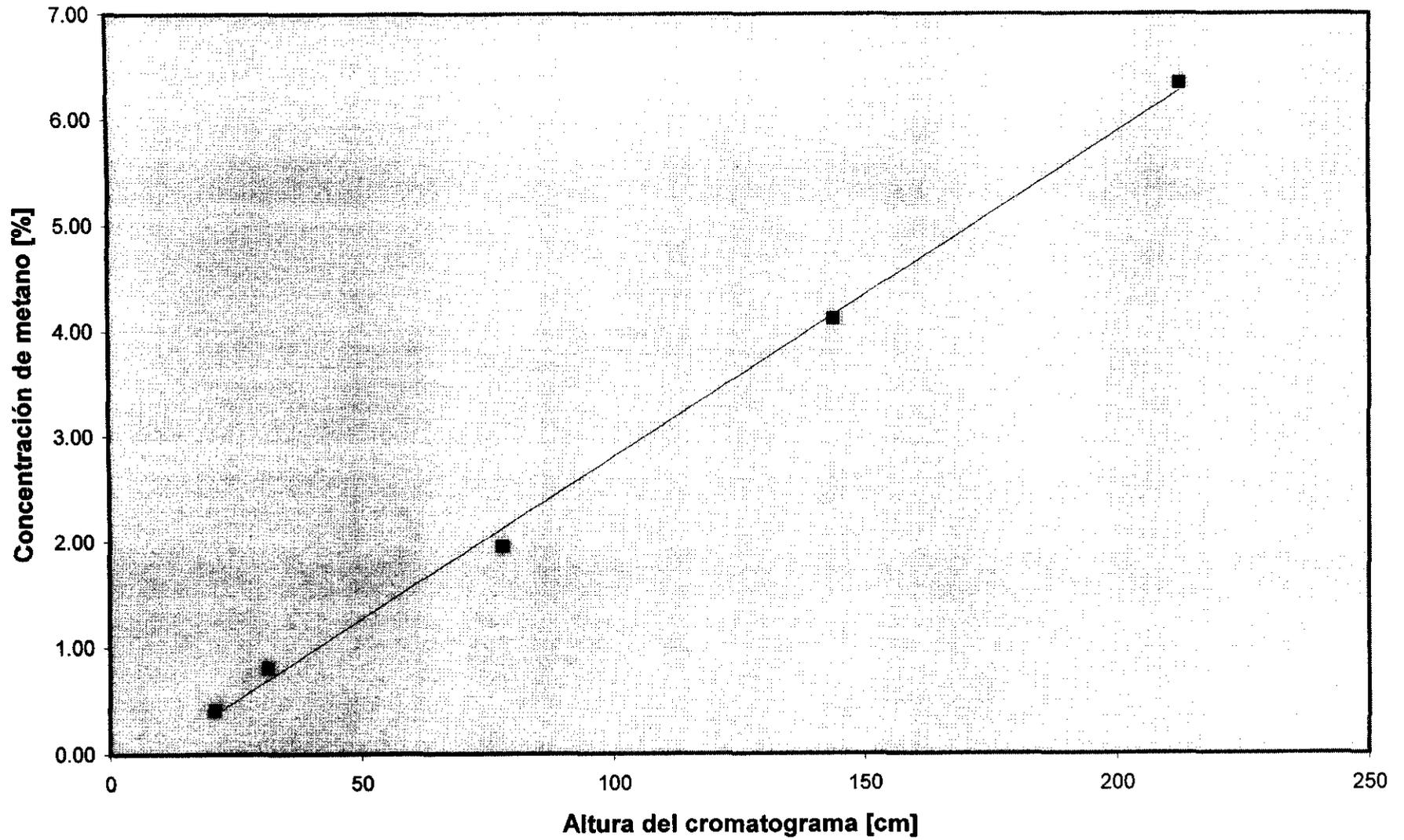


Figura 11. Cromatógrafo de Gases

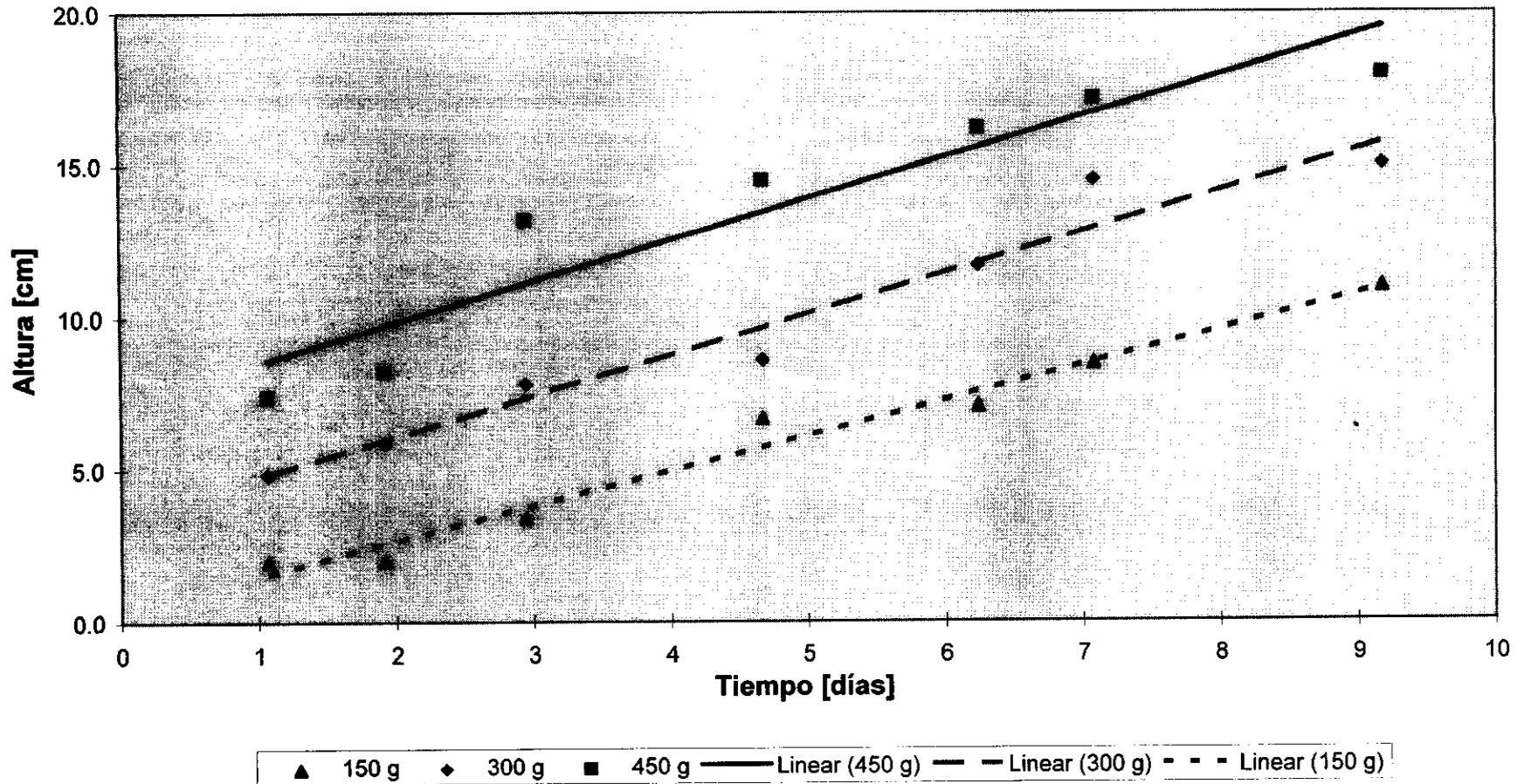
**Figura 12. Respuesta del cromatógrafo a diferentes cantidades de metano puro**



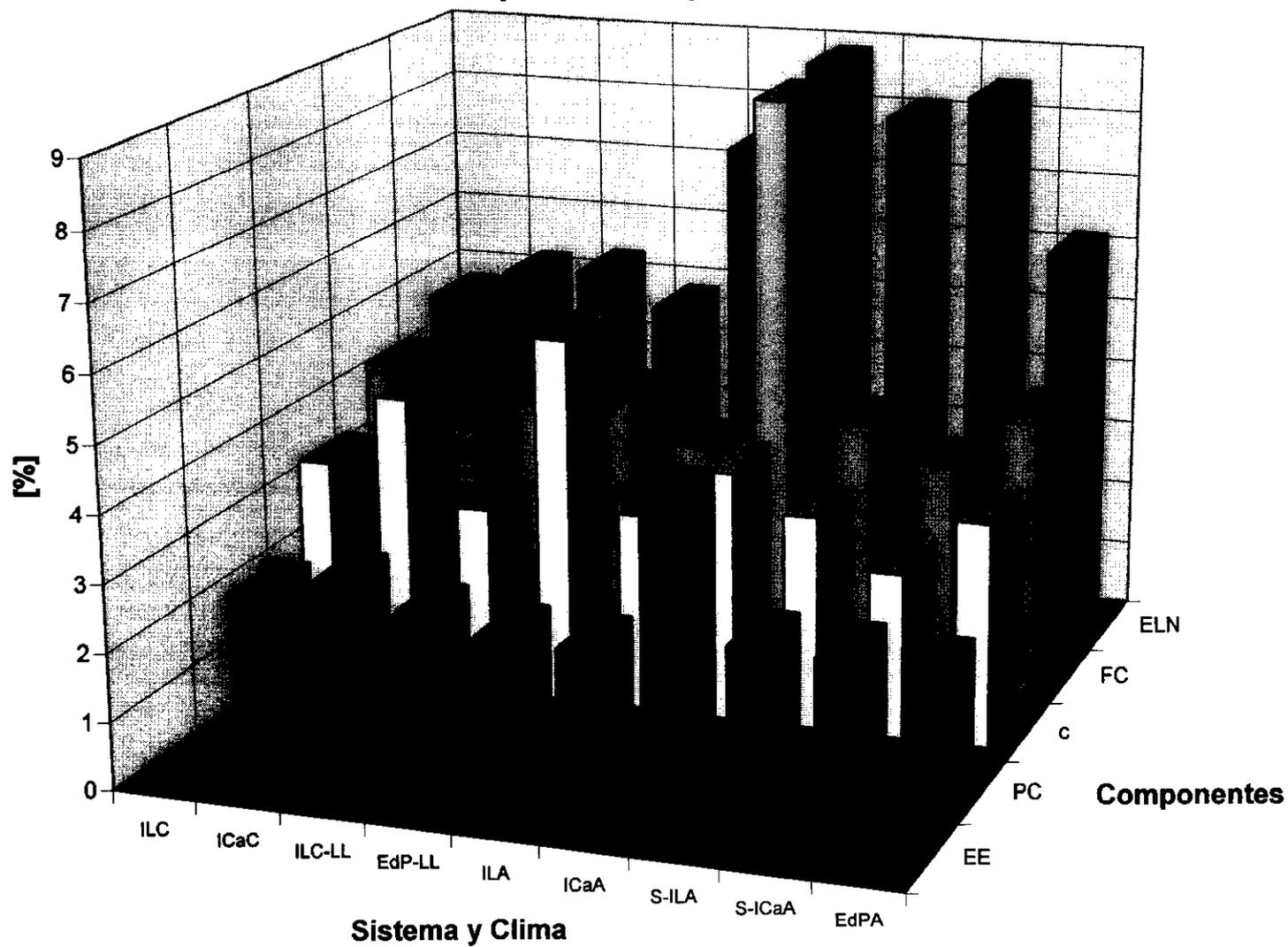
**Figura 13. Relación entre concentraciones de metano y alturas de cromatogramas**



**Figura 14. Variación de la altura de cromatogramas con el tiempo, para tres masas de excretas.**



**Figura 15. Componentes de la materia seca del estiércol, por sistema de producción y clima**



**Figura 16. Energía contenida en excretas de bovino, por sistema de producción y clima**

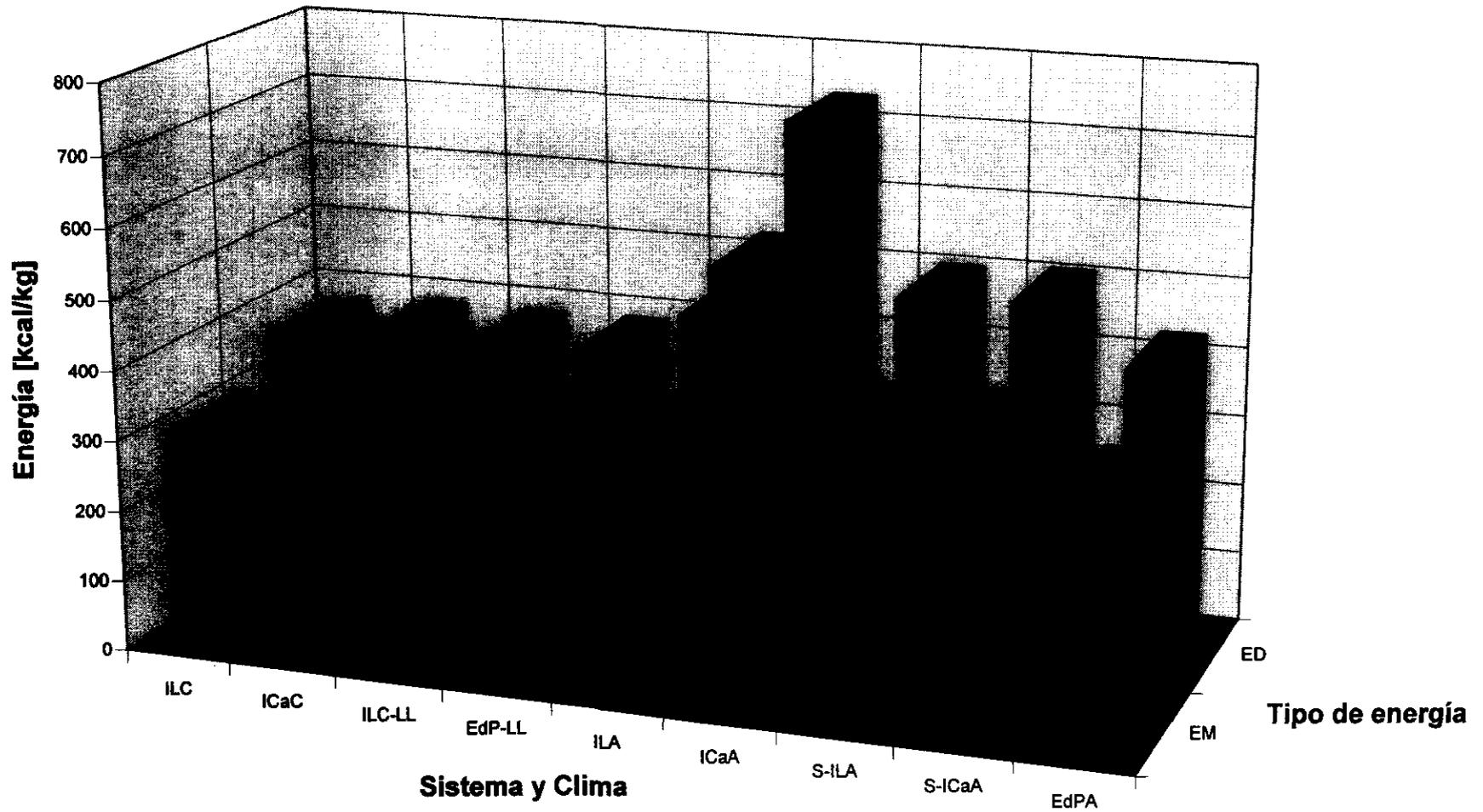
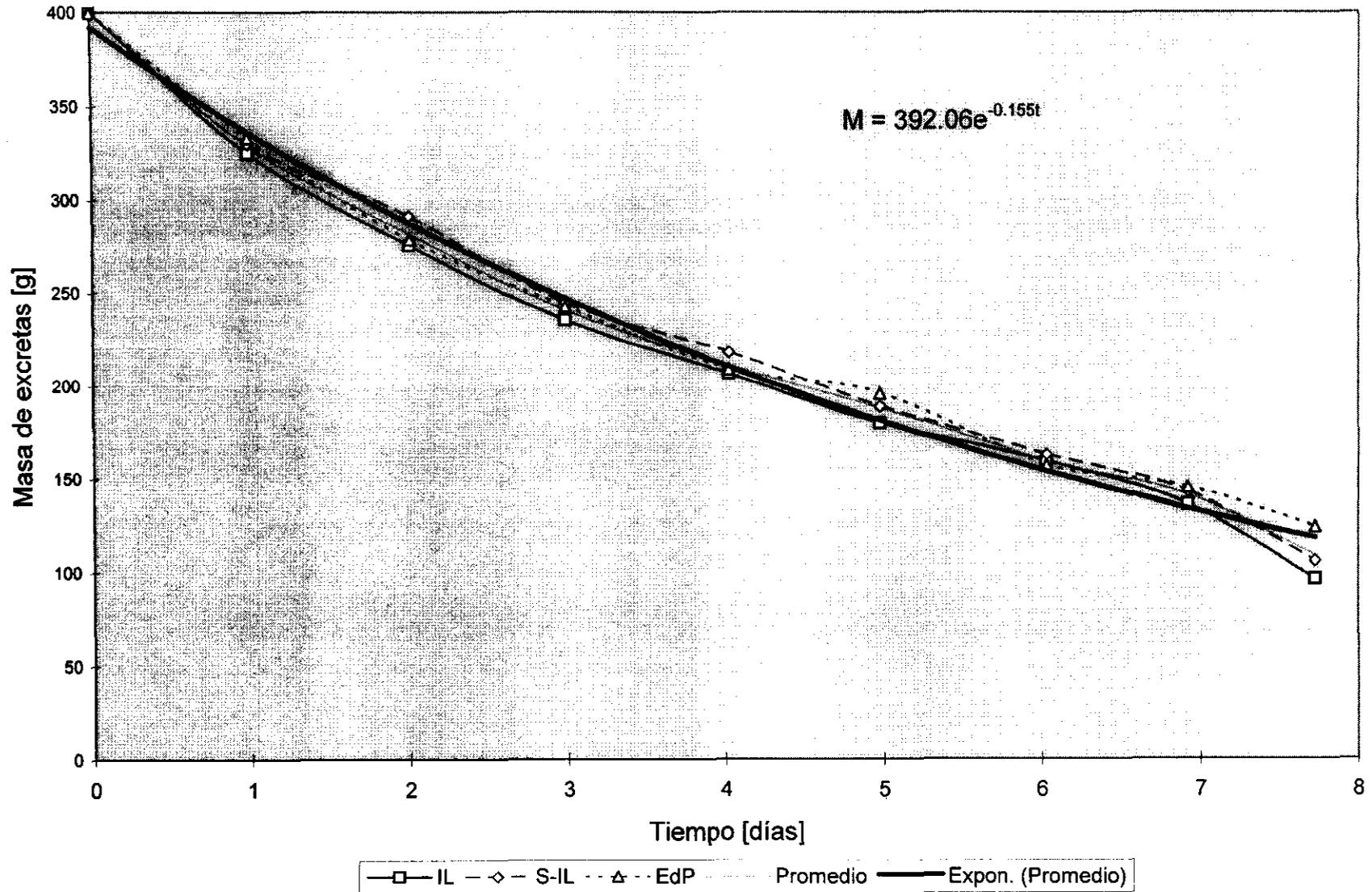
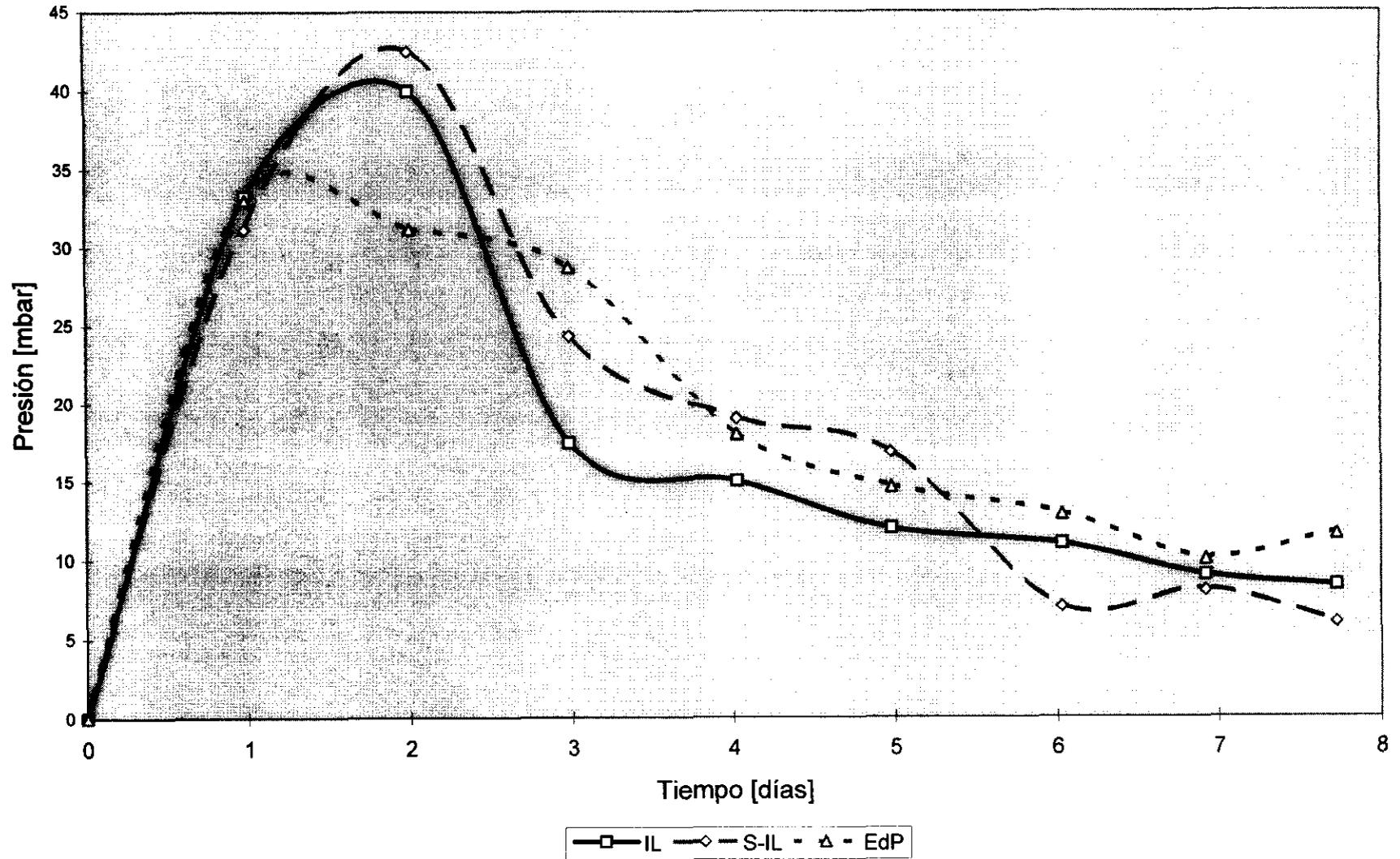


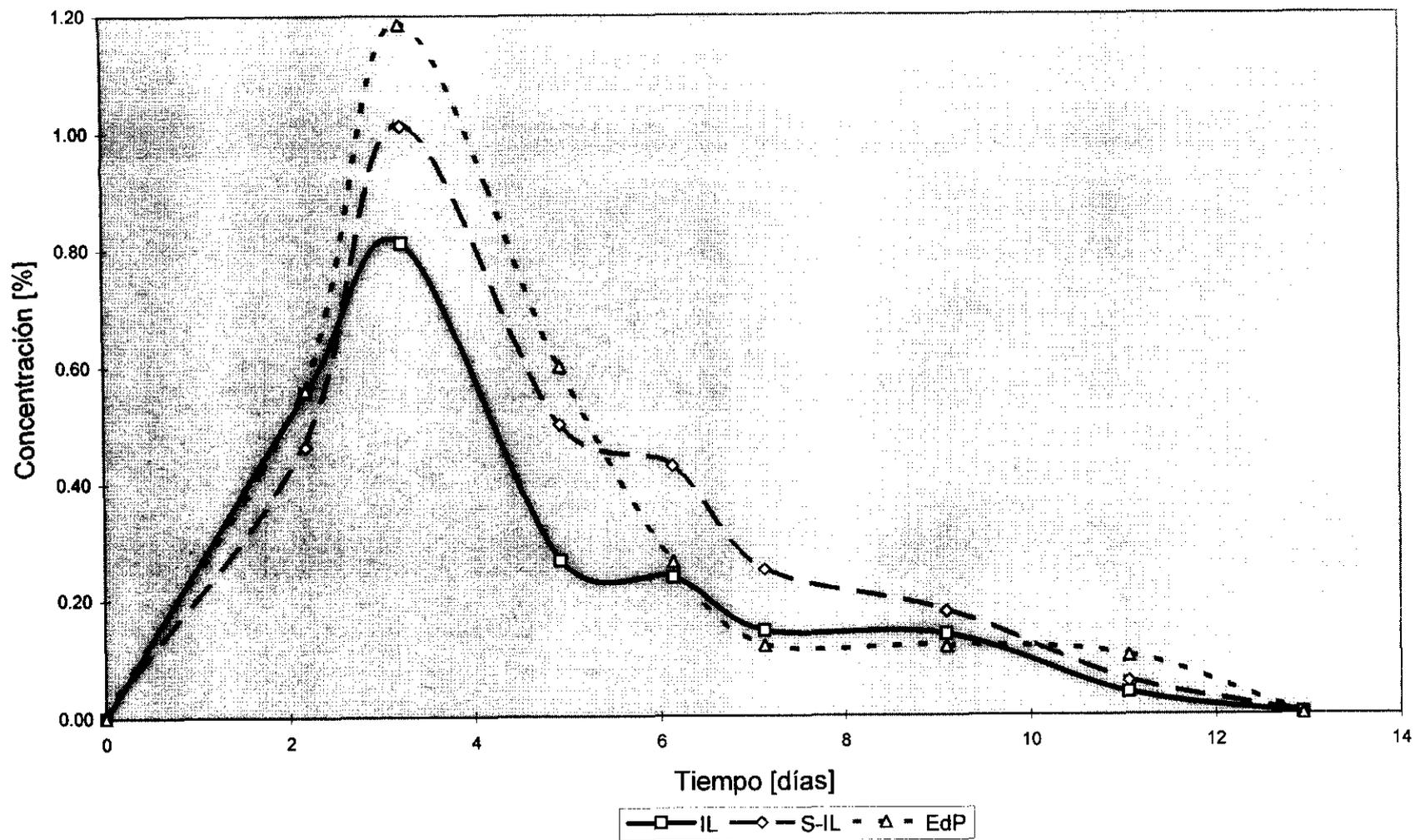
Figura 17. Variación de la masa con el tiempo de secado. 21 C.



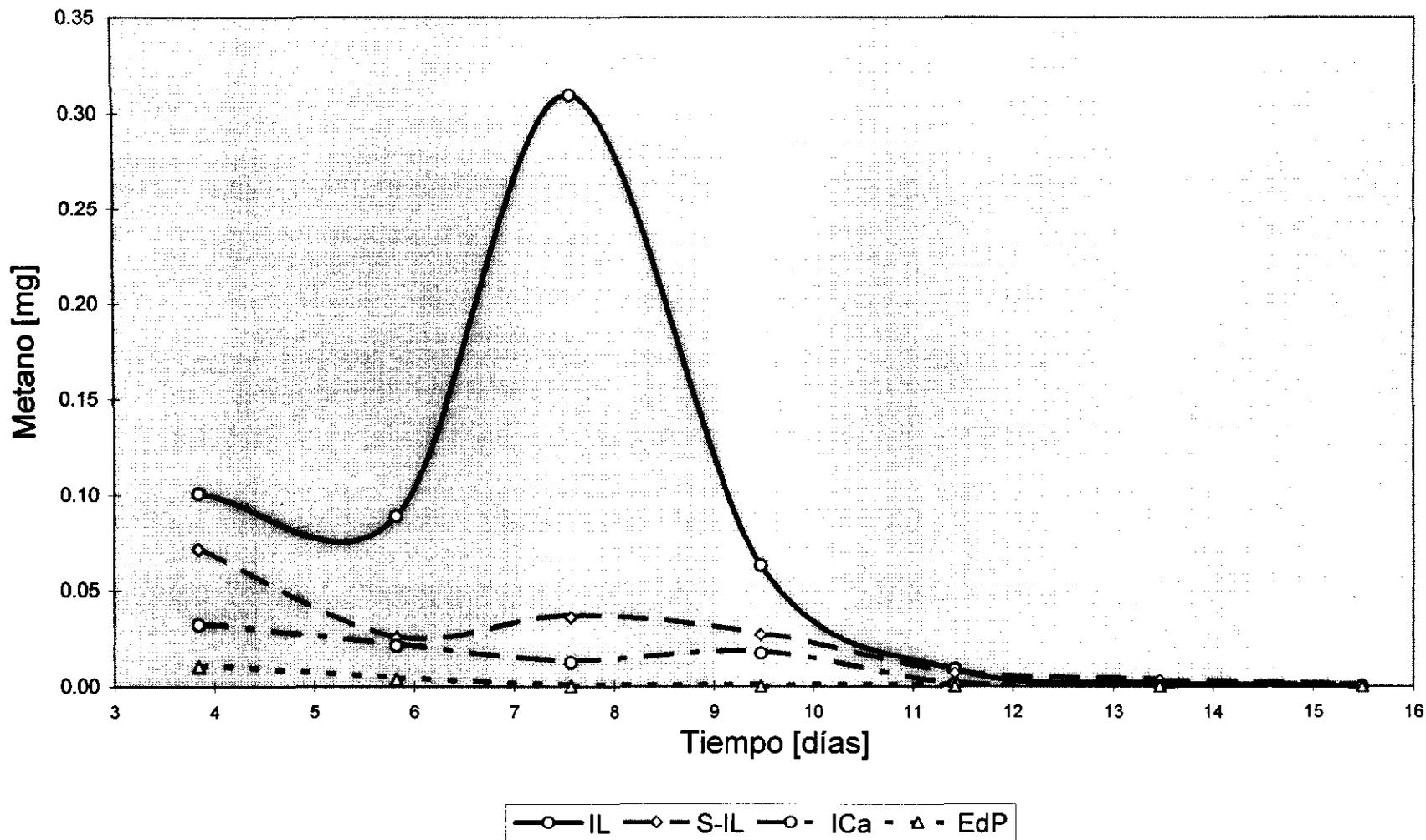
**Figura 18. Variación de la presión diaria, con el tiempo de fermentación. 21 C.**



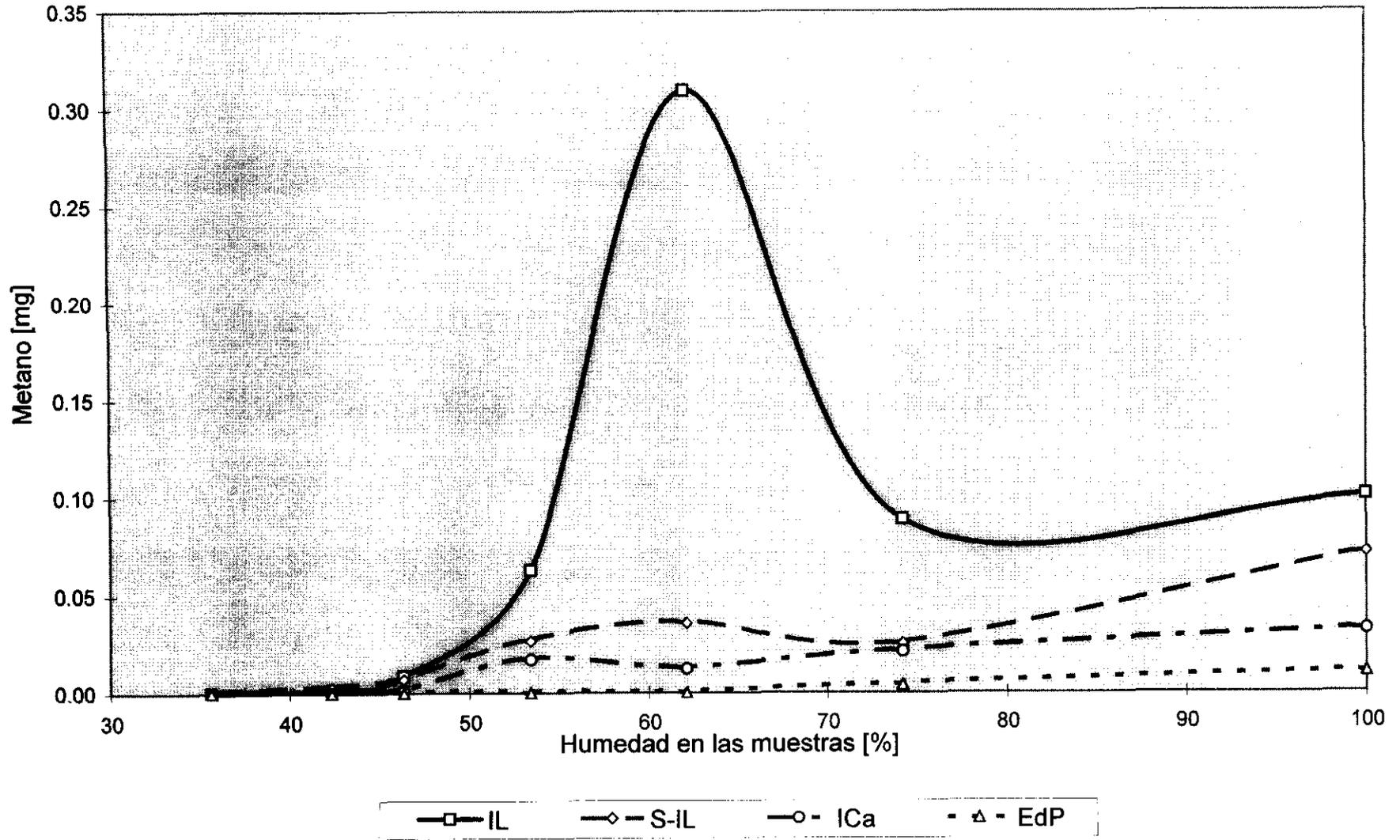
**Figura 19. Variación diaria de la concentración de metano, con el tiempo de fermentación. 21 C.**



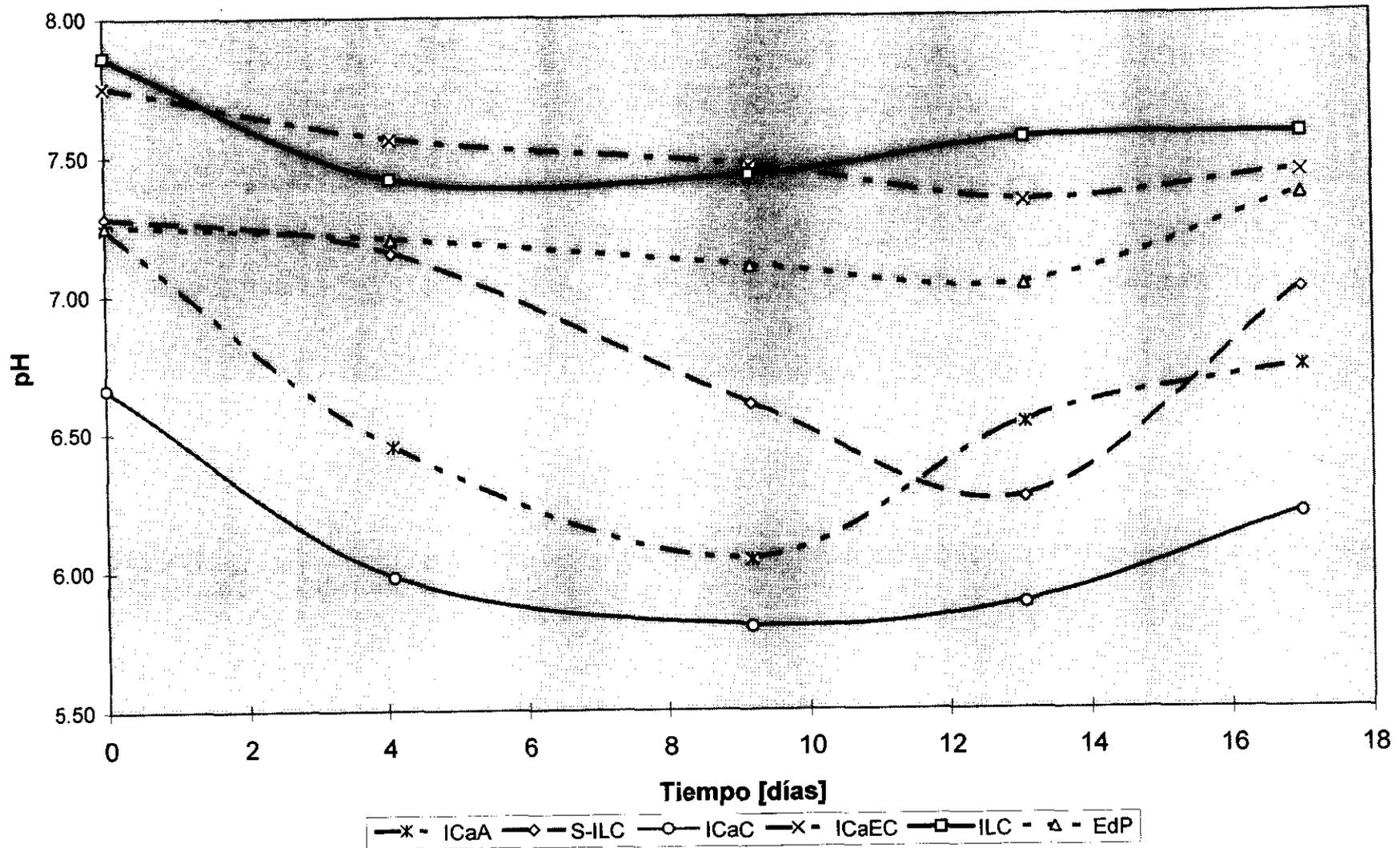
**Figura 20. Emisiones diarias de metano como función del tiempo de fermentación. 12 C.**



**Figura 21. Emisiones diarias de metano como función de la humedad.  
12 C.**



**Figura 22. Variación del pH de excretas con el tiempo de fermentación. 20 C.**



**Figura 23. Variación del pH de excretas con el tiempo, fermentadas en laguna anaeróbica a 35 C.**

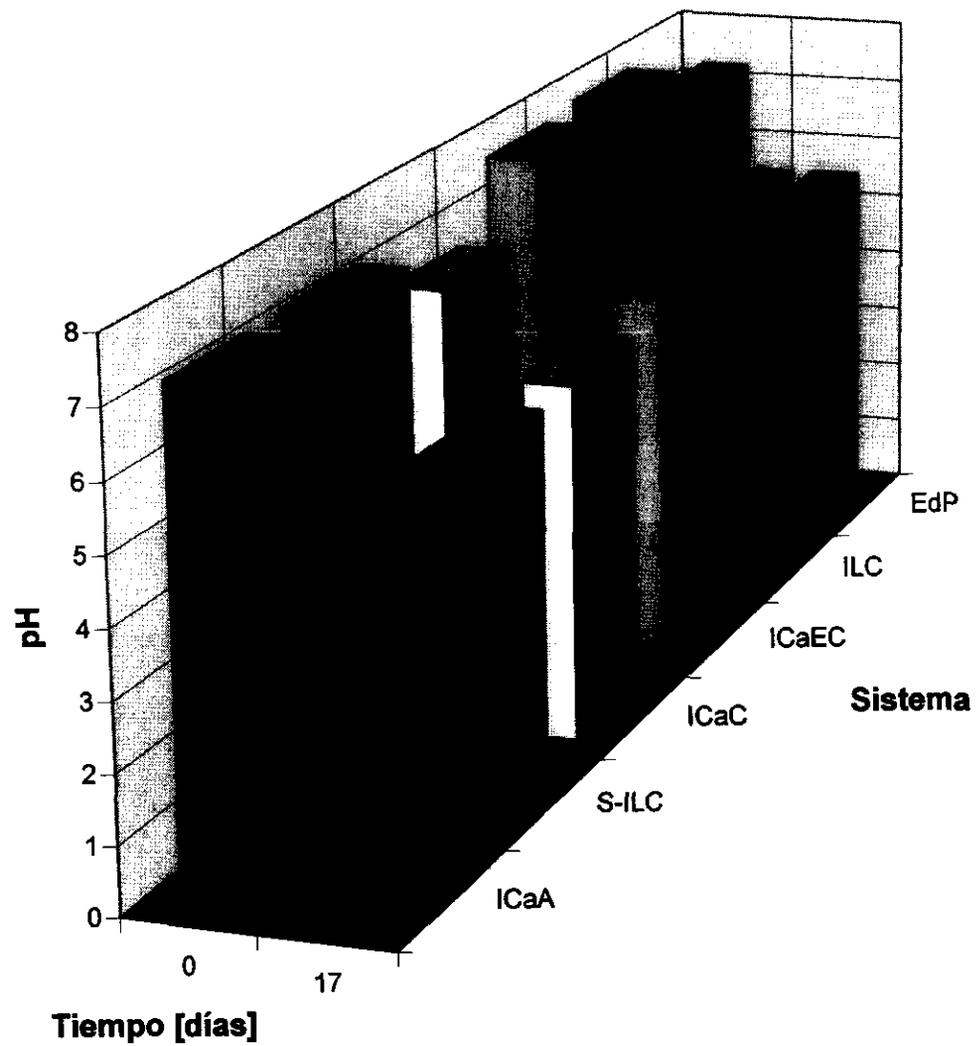


Figura 24. Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 12 C.

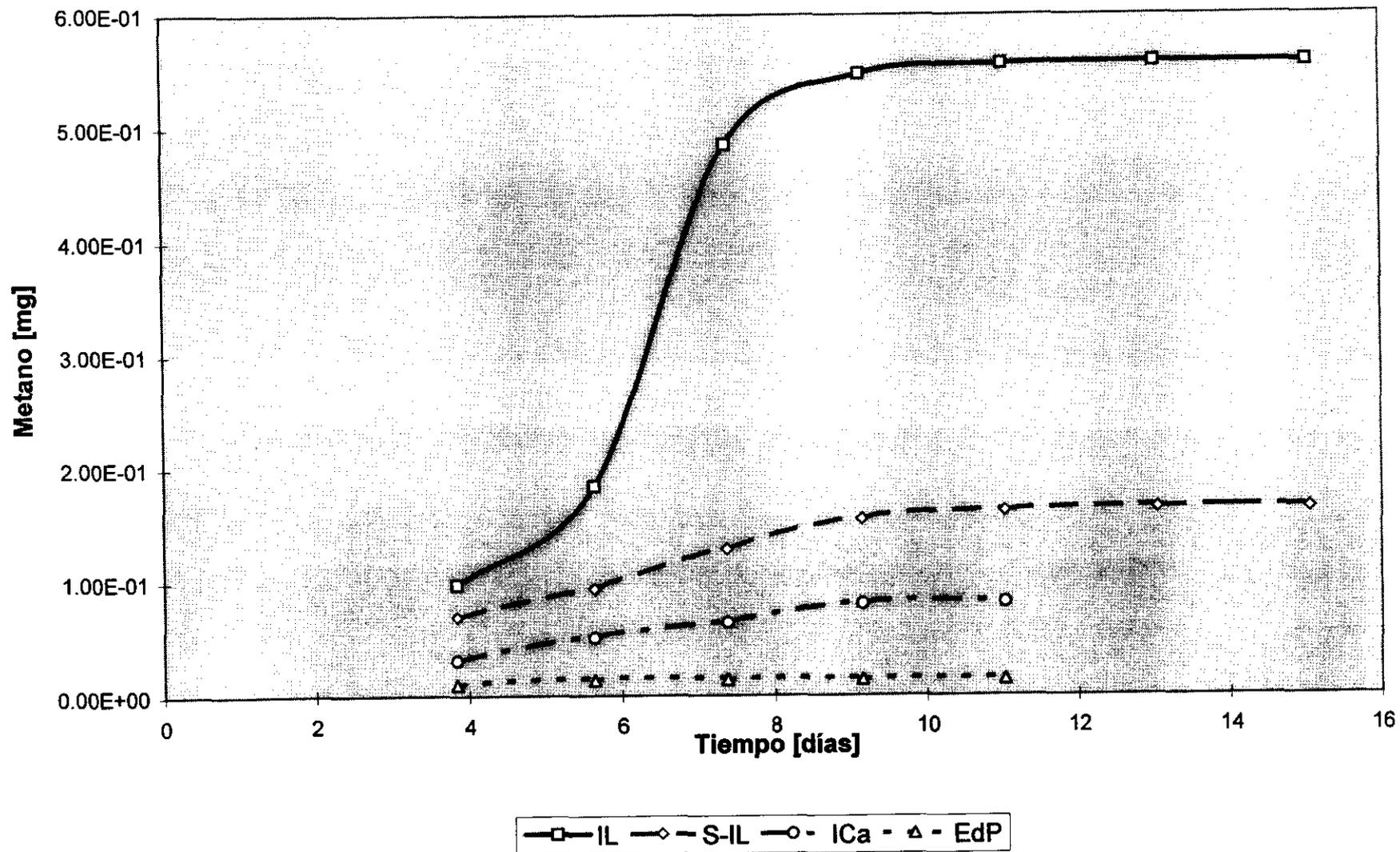


Figura 25. Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 17 C.

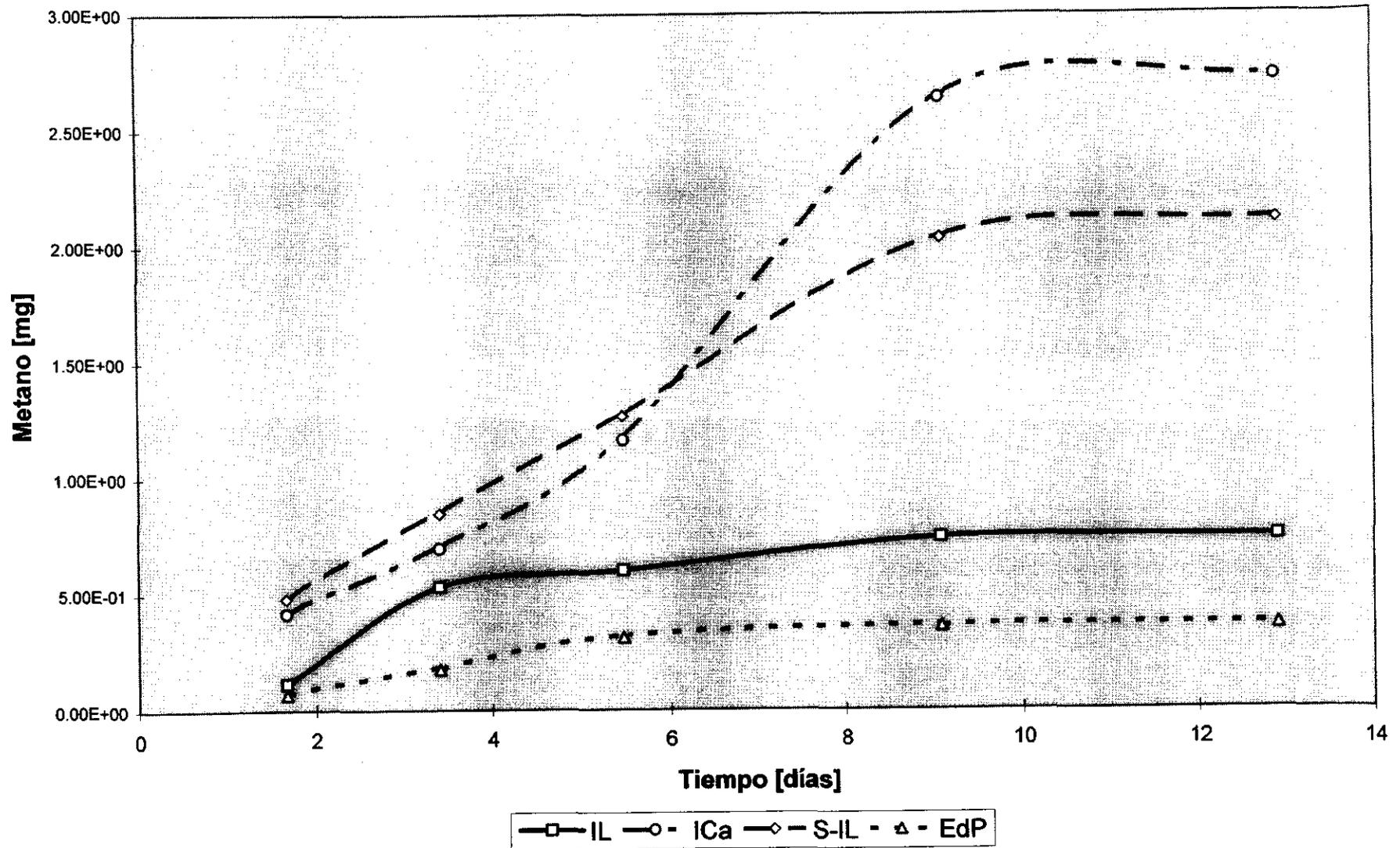


Figura 26. Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 21 C.

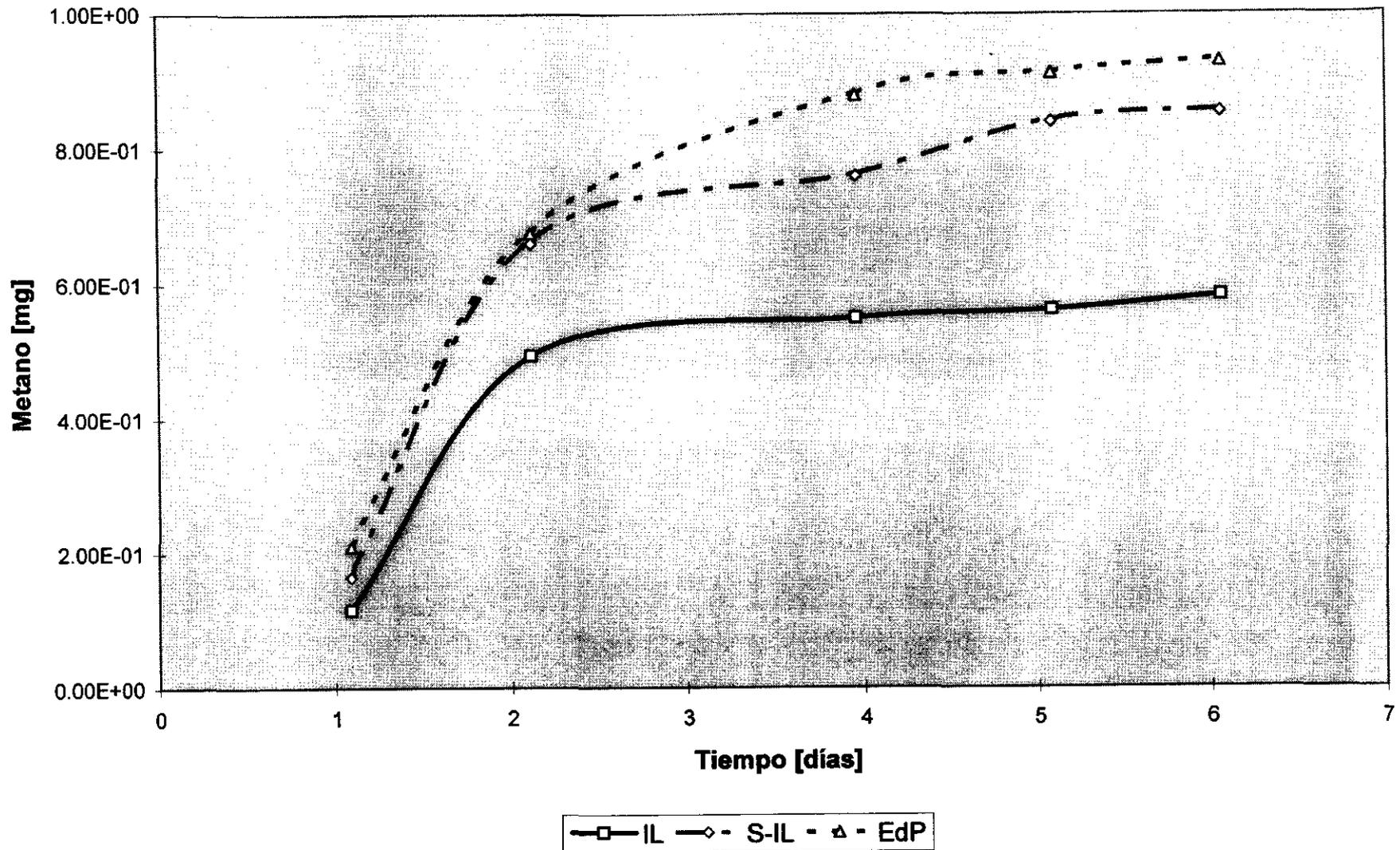


Figura 27. Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 22 C.

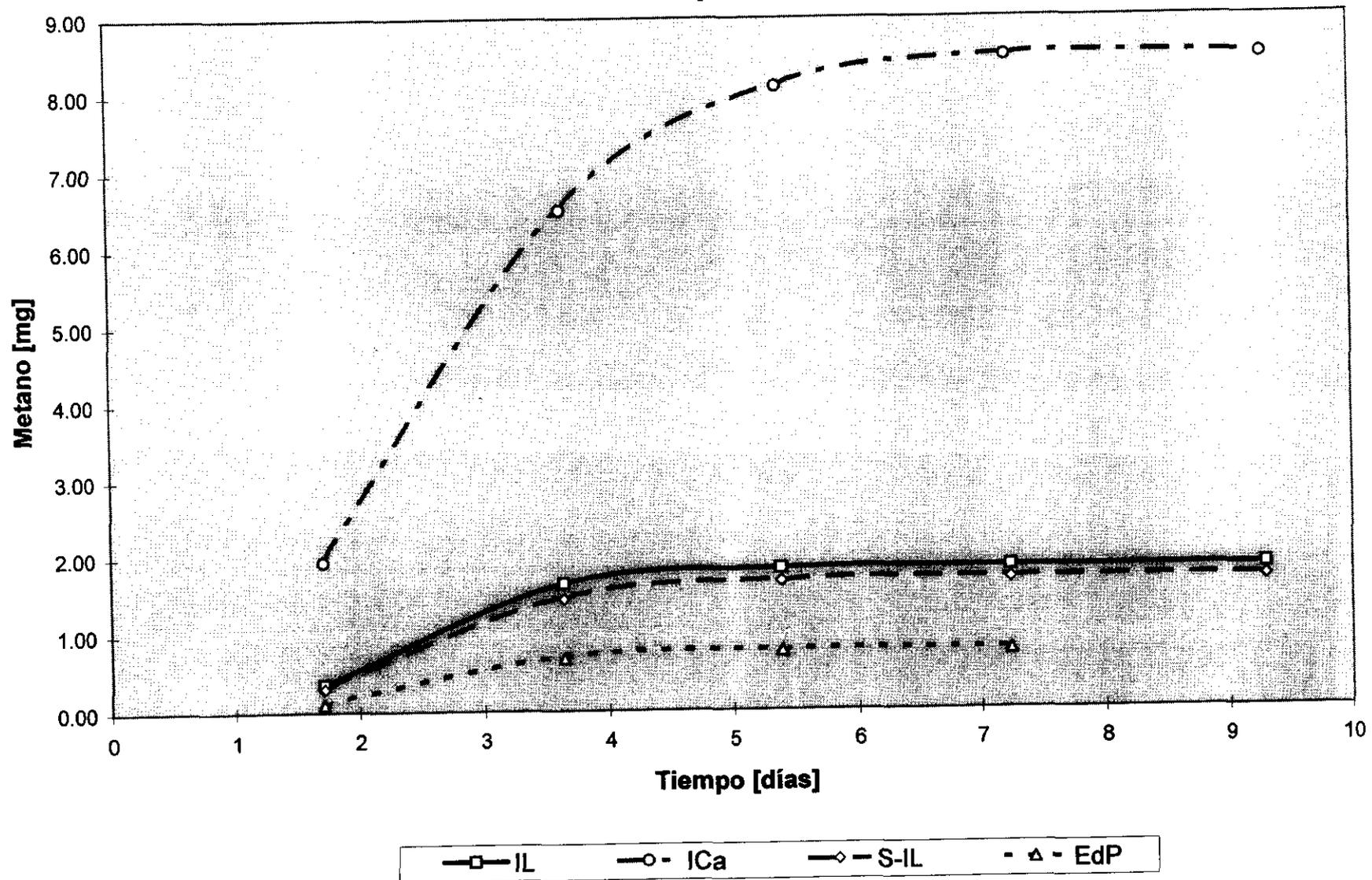
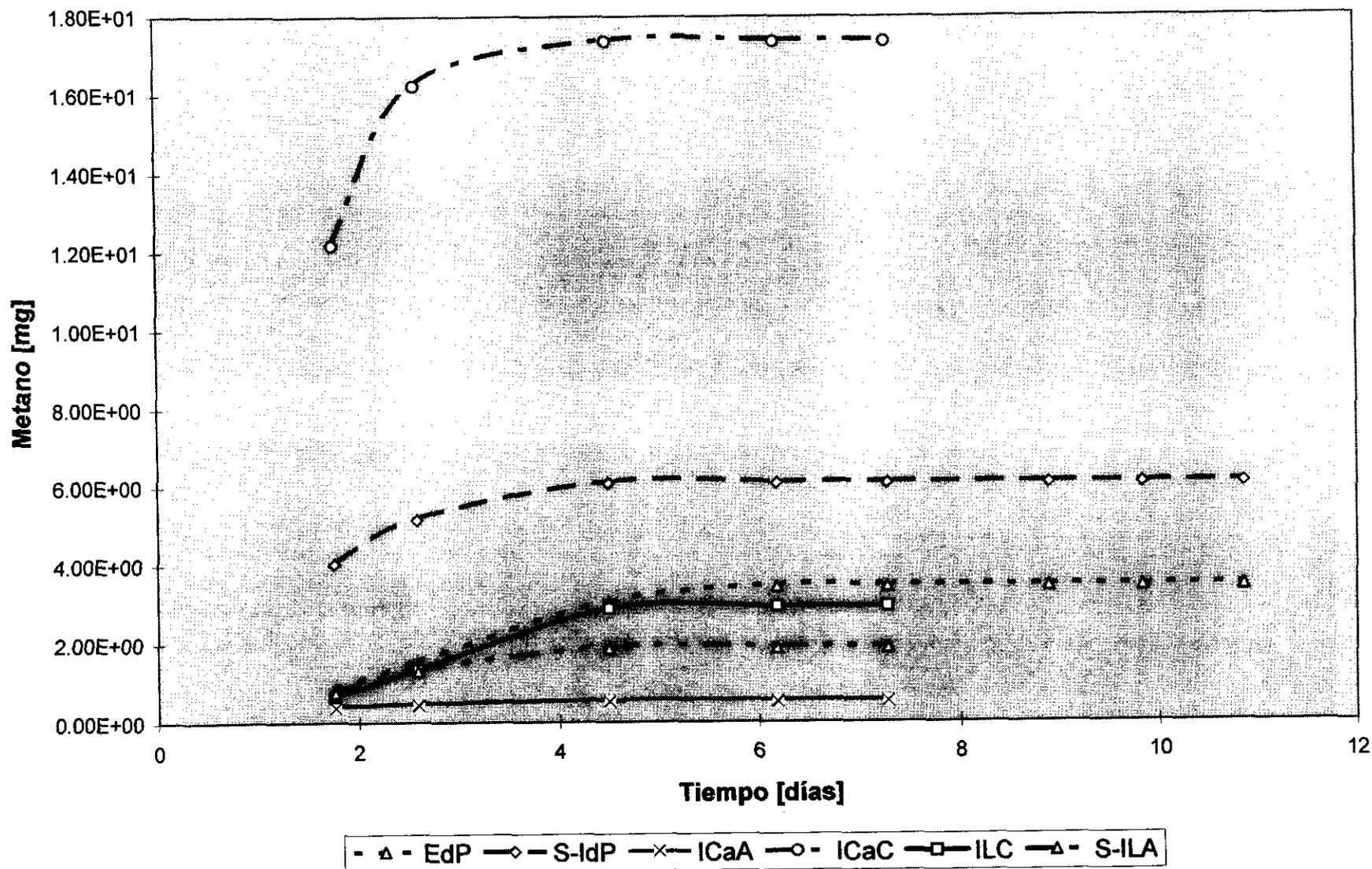


Figura 28. Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 27 C.



**Figura 29. Emisiones de metano por muestras de excretas, como función del tiempo, a 35 C.**

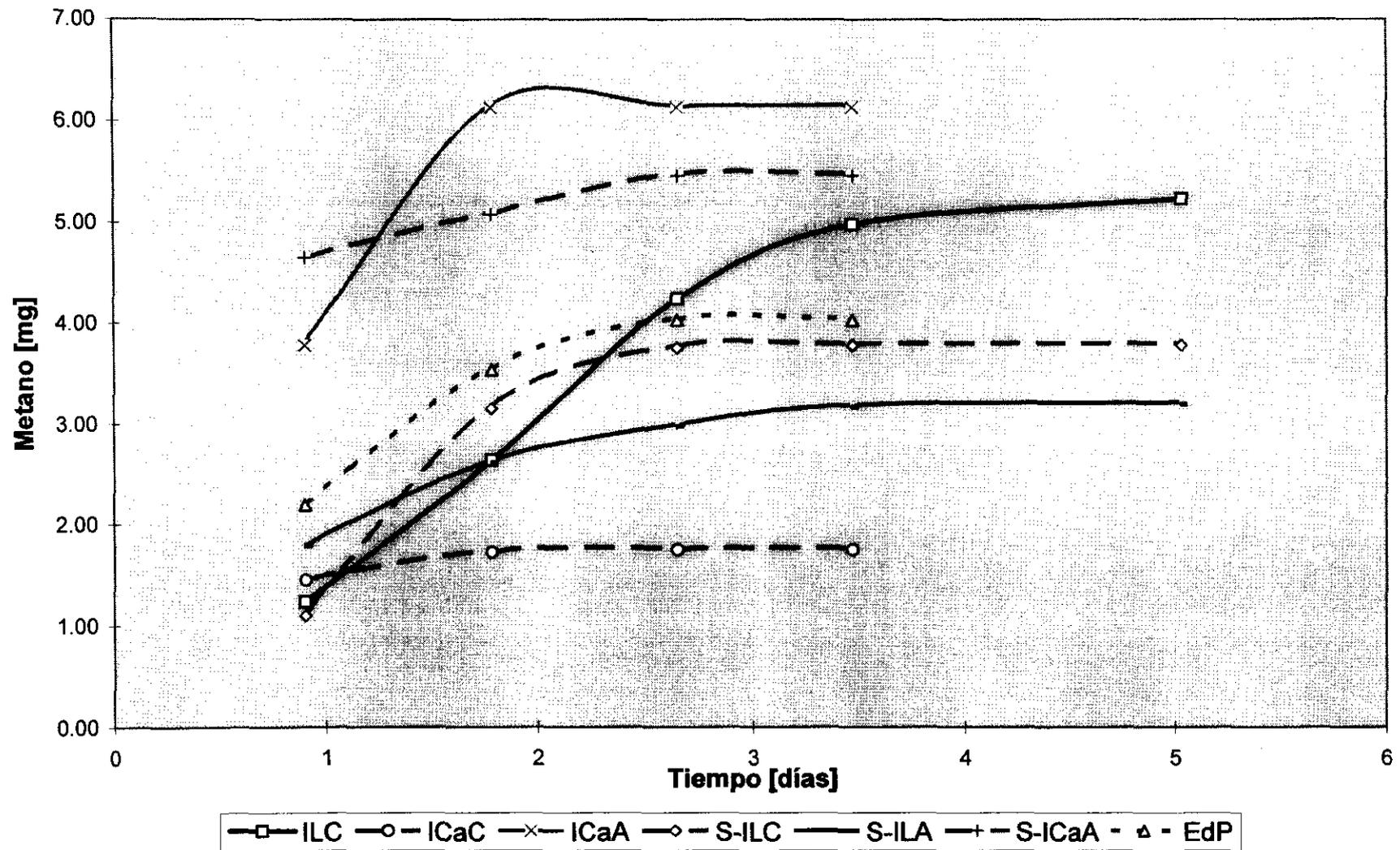
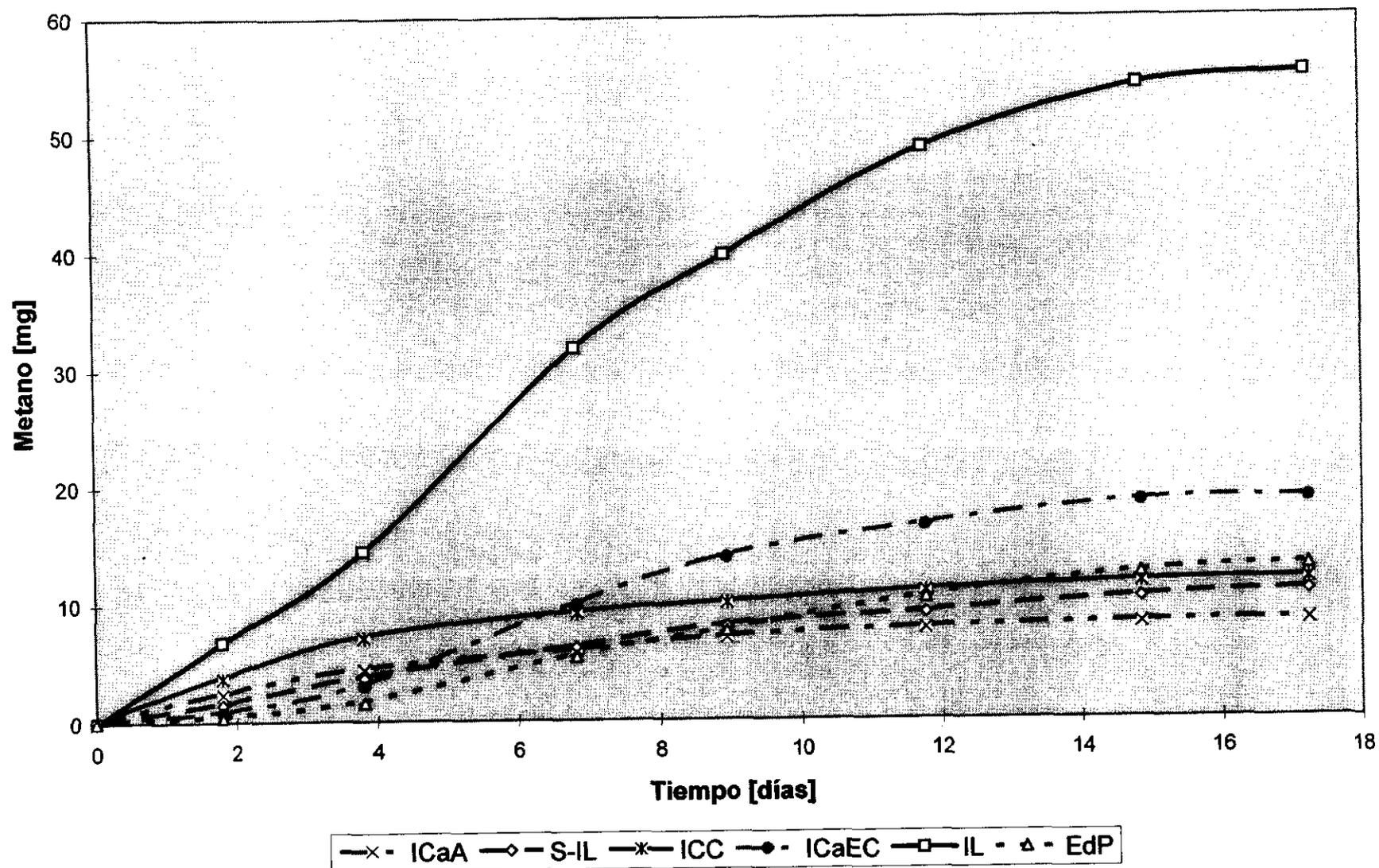
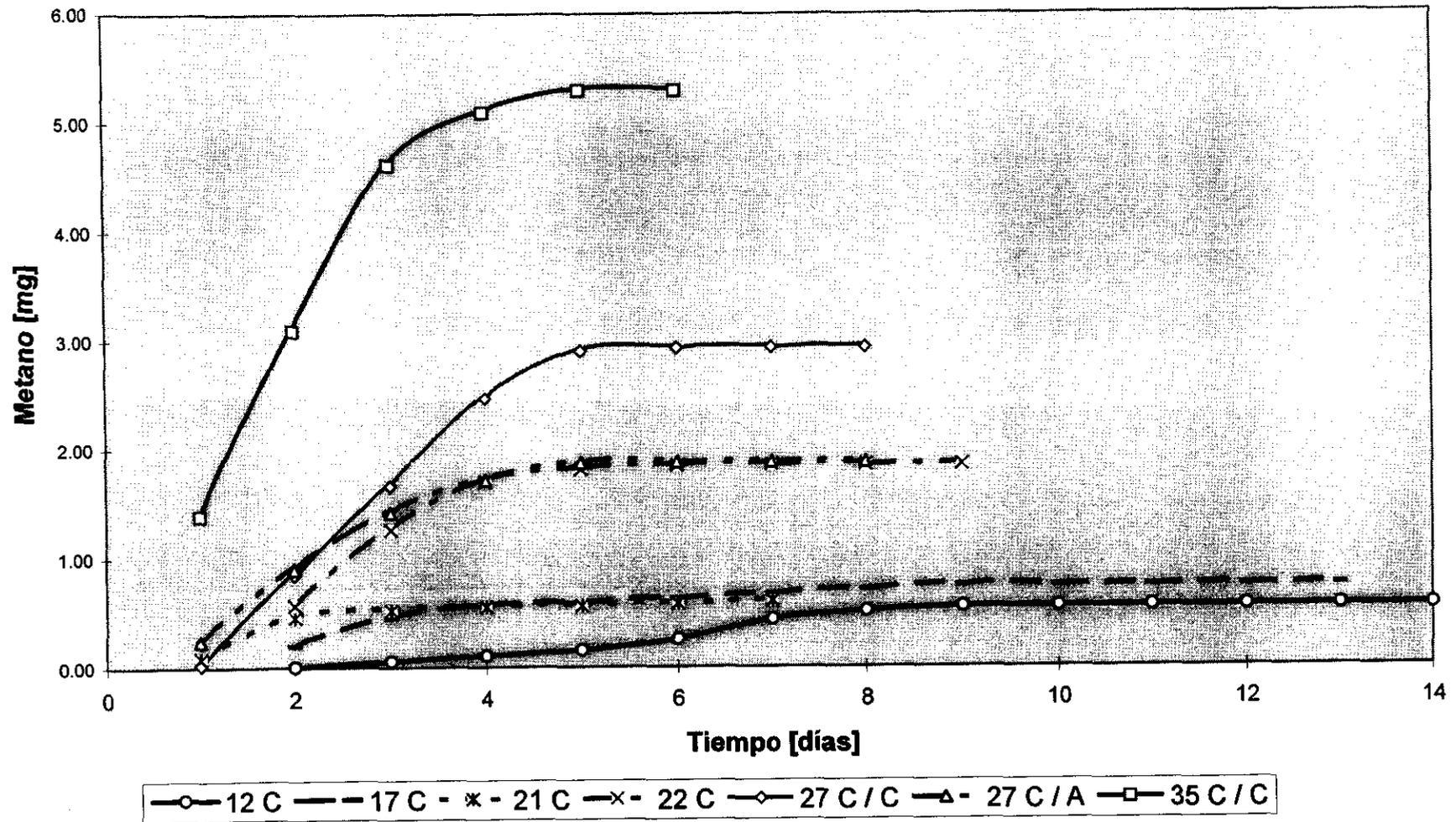


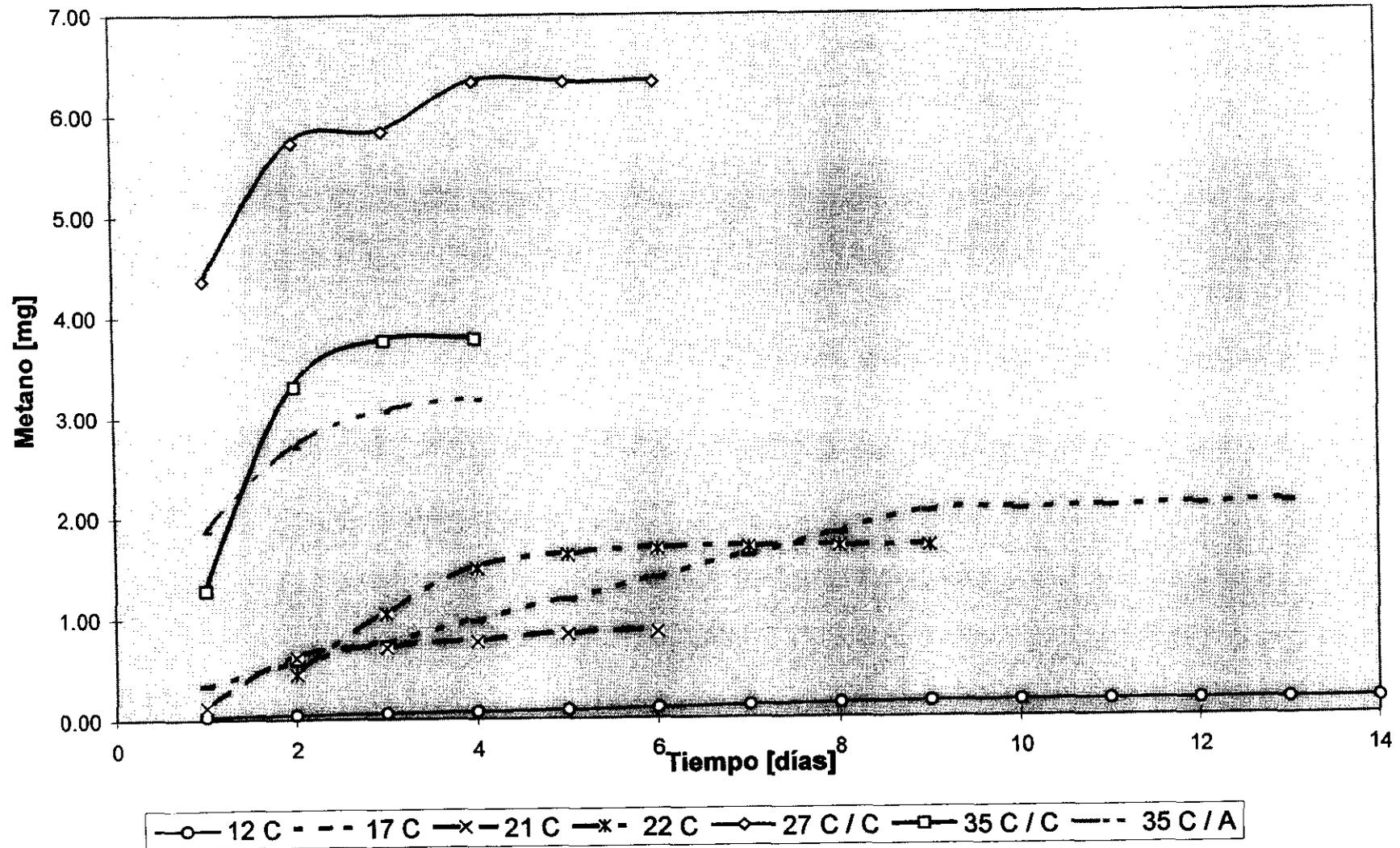
Figura 30. Metano emitido por muestras de excretas (100 g), fermentadas en laguna anaeróbica a 35 C



**Figura 31. Metano emitido por excretas de bovino lechero estabulado, con secado a varias temperaturas.**



**Figura 32. Metano emitido por excretas de bovino lechero semi-estabulado, con secado a varias temperaturas.**



**Figura 33. Metano emitido por excretas de bovino de engorda, en producción intensiva, con secado a varias temperaturas.**

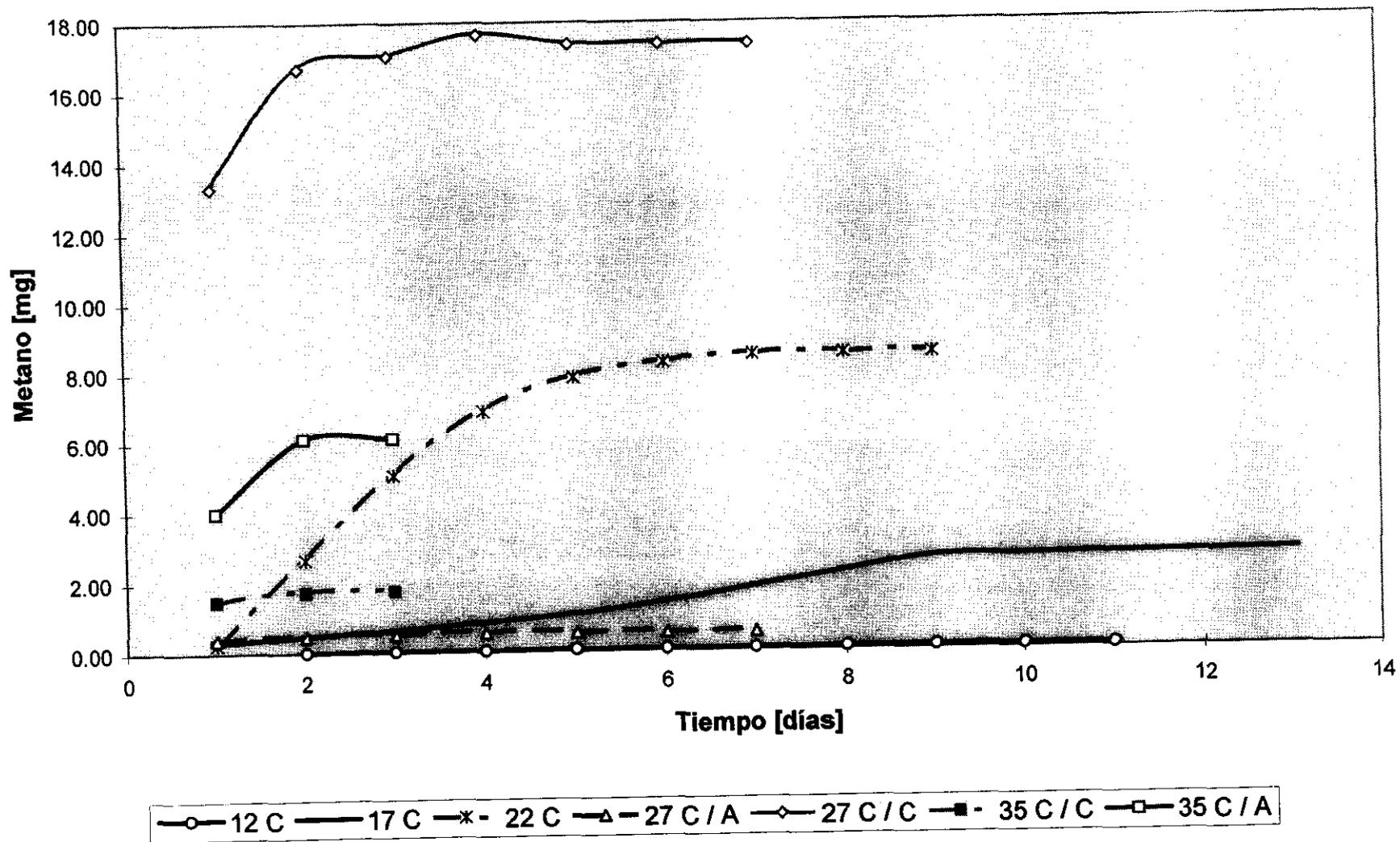


Figura 34. Metano emitido por excretas de bovino de doble propósito en pastoreo, con secado a varias temperaturas.

