

PLANEAMIENTO, ANALISIS E INTERPRETACION DE LA  
INVESTIGACION DE SISTEMAS\*

Karel Vohnout\*\*

"Nessuna humana investigazione  
si puo dimandare vera scienza  
s'essa non passa per le matematiche  
dimostrazione"

Leonardo da Vinci

INTRODUCCION

La evolución de una disciplina científica se inicia con un estado puramente descriptivo que conlleva al planteamiento de modelos empíricos; pasa luego por una fase cualitativa que permite el planteamiento de modelos teóricos y llega a su máximo desarrollo en la fase cuantitativa, con la demostración de las teorías. Durante esta evolución la intuición va siendo reemplazada progresivamente por el razonamiento lógico. Todo este proceso filosófico es en esencia analítico y constituye los cimientos de la ciencia moderna. Casi simultáneamente, aunque con algún desfase, ocurre el proceso de síntesis o de ingeniería, que da origen a las tecnologías. La síntesis

---

\* Trabajo presentado en el "Seminario sobre El Enfoque de Sistemas en la Investigación Pecuaria en el Istmo Centroamericano.

\*\* Nutricionista, Departamento de Ganadería Tropical, CATIE.

incluye la fase de reconstrucción de los procesos del mundo físico, la fase de control, y finalmente la fase del automática.

Conforme se evoluciona en el conocimiento y se pasa del estado descriptivo a la etapa cuantitativa, se hace progresivamente más necesario recurrir al lenguaje y a la demostración matemática. Dentro de este contexto, el enfoque de sistemas ofrece la metodología de análisis y de síntesis, entendiéndose por sistema al "conjunto de elementos que interaccionen para cumplir una función". Análisis de sistemas es "el proceso metodológico para obtener el conocimiento cuantitativo del sistema". Ingeniería de sistemas es "el proceso tecnológico para sintetizar, producir u organizar un sistema". En concordancia con estos delineamientos, en ciencias agrícolas la meta del análisis de sistemas será desarrollar la metodología para predecir la producción. La ingeniería de sistemas deberá utilizarse en forma complementaria para desarrollar la tecnología que oriente y controle la producción agrícola, de modo que ésta obedezca ciegamente a las necesidades.

El presente trabajo está orientado a proporcionar una visión general del enfoque de sistemas como una expresión cuantitativa del método científico. No se pretende entrar en los planteamientos matemáticos y solamente se enfocan los aspectos Bio-físicos.

## EL ENFOQUE SISTEMICO EN LA INVESTIGACION

Según se ilustra en la Fig. 1, el desarrollo de la investigación de sistemas incluye tres etapas: Investigación intuitiva, planteamiento del modelo cuantitativo y prueba de comportamiento y validación del modelo, entendiéndose por modelo "una representación de la realidad con diversos grados de abstracción".

- Fig. 1 -

La primera etapa no es otra cosa que la fase empírica identificada con la investigación tradicional en ciencias biológicas. En esta etapa no existe el respaldo de un razonamiento teórico previo y la intuición juega un papel dominante.

En el planteamiento del modelo cuantitativo se parte ya asumiendo una relación funcional causa-efecto y la intuición pasa a una ubicación secundaria. El planteamiento del modelo se define en el siguiente algoritmo:

- Identificar los elementos del sistema.
- Determinar el nivel inferior de organización en el que se va a trabajar, según el umbral de excitación del sistema.
- Estudiar las comunicaciones lógicas y del flujo entre los elementos del sistema.
- Describir el modelo en lenguaje matemático.

En la identificación de los elementos que constituyen el sistema se puede llegar a estratos de organización cuya acción

puede no ser detectable en las unidades de medida utilizadas en la evaluación del sistema, es decir, estratos que se encuentren por debajo del umbral de excitación. Por consiguiente, el análisis debe evitar incluir elementos cuya acción quede opacada por el "ruido" y que, además, vuelvan al modelo innecesariamente complejo.

La validación del modelo es el paso previo a su aplicación definitiva en la tecnología. Esta validación consiste en comparar la respuesta predecida del sistema con valores reales observados. El valor predictivo alcanzado determinará si habrá que iterar el proceso de investigación, según el flujograma de la Fig. 1. Es importante aclarar que la investigación puede ser de campo o puede realizarse mediante simulaciones numéricas en computadora.

En el planteamiento del modelo, el desarrollo del diagrama lógico es principalmente responsabilidad de los especialistas en las disciplinas relacionadas con la ciencia agronómica, es decir, de quienes establecen los objetivos y las metas. La descripción del modelo en lenguaje matemático es principalmente responsabilidad del especialista en matemáticas. La interpretación de los resultados del análisis y la prueba de comportamiento y validación del sistema será, sin embargo, una responsabilidad mixta. El desarrollo de la tecnología está en las funciones del ingeniero.

A la fecha presente en teoría de sistemas existen métodos cuantitativos bien definidos y establecidos. Sin embargo, para sistemas complejos, como es el caso de los sistemas de producción agrícola, no existen convenciones estrictas y el planteamiento de los modelos lógicos, incluyendo la simbología y la nomenclatura, pueden variar según la concepción personal del maísta o del ingeniero. Entre los extremos de lo estrictamente objetivo de las imágenes del mundo real y lo abstracto de las matemáticas, el diagrama de bloques, como método cuantitativo, no sólo ofrece la posibilidad de representar el sistema en lenguaje matemático con una visión objetiva del mundo físico, sino también ilustra la lógica invocada para describir el sistema.

### DIAGRAMA DE BLOQUES

El diagrama de bloques es una representación gráfica del sistema, que ilustra las relaciones funcionales y de flujo entre los elementos componentes. La unidad funcional en el diagrama de bloques se puede ver en la Fig. 2. Esta constituida por la entrada o "función de excitación", que se identifica con la variable independiente; la salida o "función de respuesta", que se identifica con la variable dependiente; y el bloque propiamente o "función de transferencia", que indica la forma como se relacionan las variables. En la Fig. 3 se presenta el

correspondiente equivalente en coordenadas cartesianas. Aquí la entrada es la carga animal (X), la salida es la presión de pastoreo (Y) y el bloque representa la función matemática que relaciona a las dos variables, que en el caso presente es el coeficiente de regresión (B).

- Fig. 3 -

Se indicó que el bloque es la representación gráfica de un sistema. Como tal, puede ser un mecanismo pasivo, un transformador, en cuyo caso el parámetro de salida es el mismo que el parámetro de entrada. El transformador produce un cambio cualitativo, es decir, cambia la intensidad de la señal en forma independiente al tamaño del sistema, sin cambiar la forma de energía o la potencia del sistema. Por ejemplo, al aplicar una carga al músculo, éste responde con una contracción de igual potencia a la carga aplicada; en los dos casos se trata de energía mecánica. Puede ser un mecanismo activo y cumplir funciones de amplificador, en cuyo caso se cambia la potencia de salida, sin que exista ningún cambio en la forma de energía. Aquí el cambio es cuantitativo y sí depende del tamaño del sistema. Por ejemplo, el sistema digestivo que transforma la energía bruta del alimento en energía digestible es un amplificador, con un factor de amplificación menor a la unidad. El sistema puede ser un transductor, en cuyo caso hay un cambio en la potencia de salida y, en la forma de energía. Tal es el caso de la transducción de energía luminosa a energía eléctrica por el ojo o el

cambio de materia mineral a materia orgánica que realiza la planta.

La entrada y la salida representan generalmente tasas de flujo. Sin embargo, cualquier factor que afecte el comportamiento del sistema o proporciones información al sistema así como cualquier respuesta del sistema, pueden considerarse entradas y salidas, respectivamente. En la fig. 4 se puede ver que el flujo puede dirigirse en más de una dirección, originando un "punto de partida". Además, dos o más flujos pueden juntarse para afectar al sistema, originando un "punto de adición". El punto de adición origina una combinación aditiva de entradas, tal como se ilustra en la Fig. 5. Sin embargo, dos o más entradas

- Fig. 5 -

pueden afectar al sistema en forma no aditiva (Fig. 6). Los bloques, a su vez se pueden acoplar en paralelo (Fig. 7) o en serie (Fig. 8).

- Fig. 7 -

- Fig. 8 -

Amerita mención especial el caso de la retroalimentación o retroacción. Como se puede observar en la Fig. 9, la respuesta del sistema es reciclada o "retroalimentada". Se origina así un ciclo operativo cuya información genera nueva información que modifica el comportamiento posterior del sistema. Este tipo de mecanismo es especialmente importante en los sistema de control,

correspondiendo su estudio a la Cibernética.

- Fig. 9 -

La combinación de bloques permite representar operaciones algebraicas en forma objetiva. En la Fig. 10A se puede observar la

- Fig. 10A -

representación de un sistema de ecuaciones en diagrama de bloques, y en la Fig. 10B su solución. Este proceso de simplificación es exactamente

- Fig. 10B -

el que implícitamente se realiza cuando se establece, según se mencionó, el nivel de organización en el que se debe trabajar acorde con el umbral de excitación del sistema. Este sería el caso de la producción del ganado en función del consumo de pasto, representado en la Fig. 11A. Una expansión de este sistema se ilustra en la Fig. 11B. Cada uno de los bloques en la Fig. 11B podría a su vez expandirse en forma compleja y de difícil descripción en términos cuantitativos. Para obviar este inconveniente se puede evaluar el sistema con relaciones empíricas, tal como se ha hecho en la Fig. 11B. De acuerdo a las necesidades del análisis, el modelo debe tener el nivel de simplificación que se haga necesario. Deberá tener, sin embargo, suficiente expansión como para describir adecuadamente todos aquellos eventos e interacciones que afectan el sistema en forma detectable, en otras palabras, que sobrepasen el umbral de

excitación del sistema.

- Fig. 11B -

Los cambios en el sistema en función del tiempo pueden describirse mediante ecuaciones diferenciales. La Fig. 12 describe la situación asumiendo el caso más simple en que el flujo de entrada y el flujo de salida son valores constantes. Aquí  $K_1$  podría ser, por ejemplo, el flujo energético de entrada a un tejido y  $K_2$ , con signo negativo, el gasto de energía, que será proporcional al tamaño  $S$  de dicho tejido. El cambio en el nivel energético del sistema  $S$  será  $dS/dt$ .

- Fig. 12 -

### ENFOQUE METODOLÓGICO EN LA INVESTIGACION DE SISTEMAS DE PRODUCCION GANADERA

Los sistemas agronómicos son sistemas probabilísticos complejos. Si se considera únicamente los aspectos bio-físicos, hay que incluir en el estudio el suelo, la pastura y el animal. Los sistemas de producción ganadera son esencialmente sistemas agronómicos. Por consiguiente, en la concepción analítica que sigue, el animal funciona como el elemento transductor para convertir los recursos agronómicos en un determinado producto de consumo humano. Como se indicó oportunamente, se busca la predicción de la producción animal y el control de sistemas. En consecuencia, debe predecirse no sólo el comportamiento del

animal como transductor, sino también la producción de los recursos. Este enfoque será ilustrado mediante algunos ejemplos tomados de un proyecto en marcha, cuyo objetivo es el desarrollo de un sistema de alimentación para ganado en pastoreo que permita predecir con suficiente precisión la producción en función a los insumos de alimentación. El planteamiento general se presenta en la Fig. 13.

- Fig. 13 -

Fue necesario desarrollar, por razones de conveniencia, la cimbología definida en la Fig. 14.

- Fig. 14 -

El sistema de la Fig. 13 contiene dos módulos acoplados al sistema planta, el módulo que corresponde al flujo de minerales y el módulo del flujo del agua en el suelo. El sistema planta recibe salidas de estos dos módulos que se traducen en el crecimiento de la planta. Este crecimiento es el recurso que se acumula en el comportamiento de la pastura desde donde emite un flujo de salida al sistema animal. Nótese que los flujos de materia entre los diferentes compartimientos son afectados por mecanismos activos. Para su descripción y estudio estos mecanismos deben ser convenientemente expandidos. Un posible proceso de expansión, tomando como ejemplo el sistema animal, se ilustra en la Fig. 15. Nótese que el sistema animal como transductor afecta uno de los flujos de salida del compartimiento de forraje disponible de la Fig. 13. En la Fig. 15 se han considerado

dos clases de flujos: Un flujo material, en líneas sólidas y un flujo de información, en líneas divididas. El flujo material se refiere a la transformación del pasto en producto animal, en este caso particular, crecimiento. Como flujos de información se consideran aspectos cualitativos del pasto y la dimensión del sistema, determinada por el peso corporal del animal.

- Fig. 15 -

El paso que precede a las pruebas de comportamiento y de validación del modelo es encontrar los coeficientes para las funciones matemáticas propuestas. El siguiente algoritmo define los eventos involucrados en este paso:

- Buscar información cuantitativa en la literatura.
- Simular numéricamente cada proceso unitario del modelo usando la información experimental disponible.
- Simular numéricamente el modelo completo ajustando iterativamente los valores de los coeficientes.

Frecuentemente no se cuenta con toda la información cuantitativa para someter a prueba de comportamiento al modelo. Si la simulación numérica no es suficiente para llenar el vacío de información, ésta deberá generarse en el campo experimental.

Generar información de campo puede requerir sofisticados diseños experimentales fundamentados en el acople de experimentos orientados en forma interdisciplinaria. Por ejemplo, para

estudiar la acción de factores tales como fertilización, suplementación y manejo de pasturas sobre el sistema de la Fig. 13, se puede diseñar una serie de experimentos que se acoplan en forma de serie o en forma radial con una unidad experimental central. Este acople se ilustra en la Fig. 16, con relación a la acción de la fertilización nitrogenada, ciclos de rotación y suplementación energética y proteica sobre el sistema. Se puede notar que la característica principal es que la unidad experimental central y las unidades satélite se acoplan mediante por lo menos un tratamiento compartido, el tratamiento de acople. En esta forma se consigue no solo la información para las entradas al sistema, sino también los grados de libertad necesarios para su análisis.

- Fig. 16 -

El planteamiento analítico propuesto permite evaluar no solo la respuesta del sistema como un todo, sino también lo que ocurre dentro del sistema en cada uno de los procesos unitarios. Por ejemplo, la Fig. 17 muestra la producción de carne en una pradera de pasto Guinea\*

- Fig. 17 -

en función de la presión de pastoreo y de la suplementación

---

\* Vohnout, E. y Lasso, M. Developing pasture-livestock feeding systems for the Tropics. In First International Symposium Feed Composition, Animal Nutrient Requirements, and Computerization of Diets", Utah State Univ., Logan Utah, U.S.A. July 11-16, 1976.

energética. En la Fig. 18 se evalúa lo que ocurrió con la producción a nivel de

- Fig. 18 -

unidad animal que es un nivel de organización a un estrato inferior. La Fig. 19 muestra un tercer estrato de organización, la síntesis de

- Fig. 19 -

proteína microbiana. En la Fig. 20 se evalúa el factor de amplificación del sistema, o sea la eficiencia de utilización del alimento.

- Fig. 20 -

El planteamiento se vuelve más subjetivo cuando se introducen elementos socio-económicos-administrativos, pues resulta en extremo difícil someter el modelo a la descripción matemática. Sin embargo, a pesar de las dificultades para describir estos modelos mediante lenguaje matemático, por lo menos es posible visualizar claramente y en forma lógica la integración de los elementos bio-físicos con los elementos socio-económicos, su interacción y su acción para modular la respuesta del sistema.

En conclusión, el enfoque sistémico es un paso obligado en la evolución de las disciplinas científicas y de las tecnologías que se desarrollan alrededor de ellas. Permite establecer prioridades en forma cuantitativa desenfatiando la importancia de la intuición, factor dominante en la mentalidad tradicional. Sin un enfoque sistémico resulta difícil superar la fase empírica. En

el caso de la producción agropecuaria, la tecnología a desarrollarse debe estar respaldada por el conocimiento científico cuantitativo de un sistema extremadamente complejo.

---

---

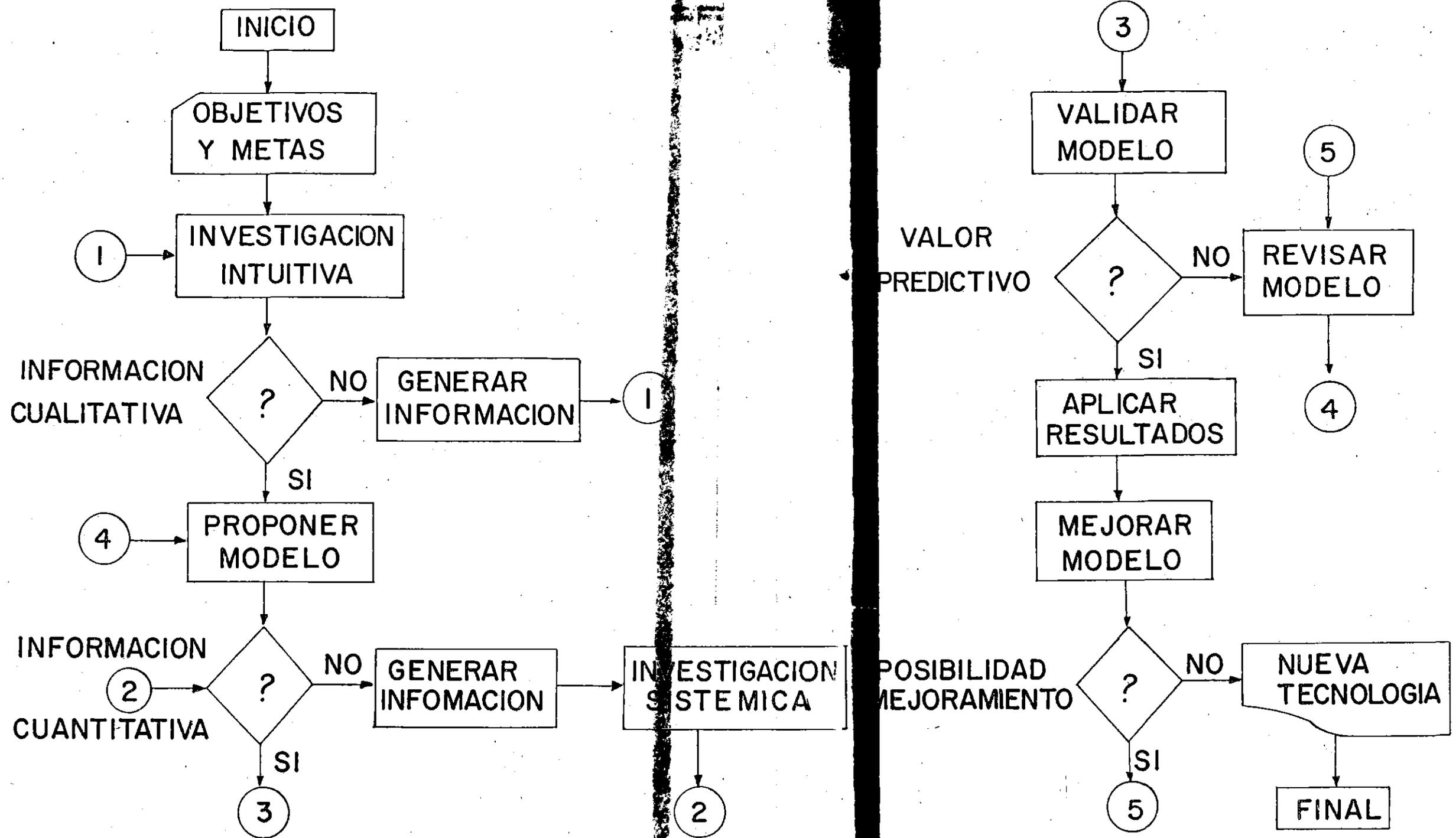


Fig. 1 EXPRESION SISTEMICA DEL METODO CIENTIFICO

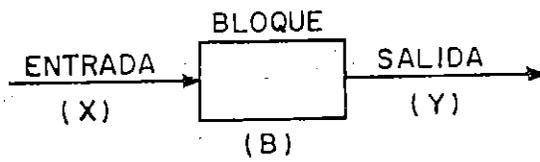
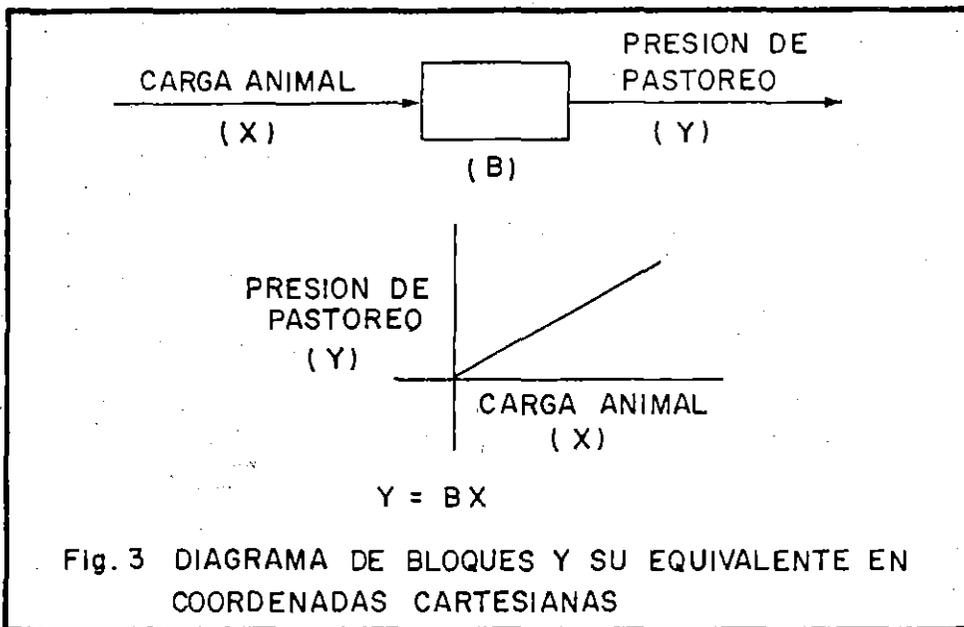


Fig. 2 UNIDAD FUNCIONAL EN EL DIAGRAMA DE BLOQUES



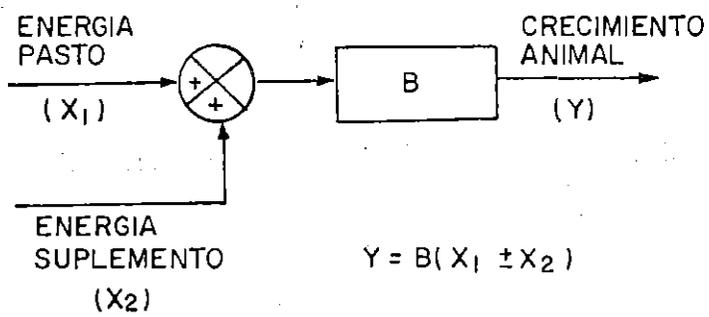


Fig. 5 COMBINACION ADITIVA DE ENTRADAS

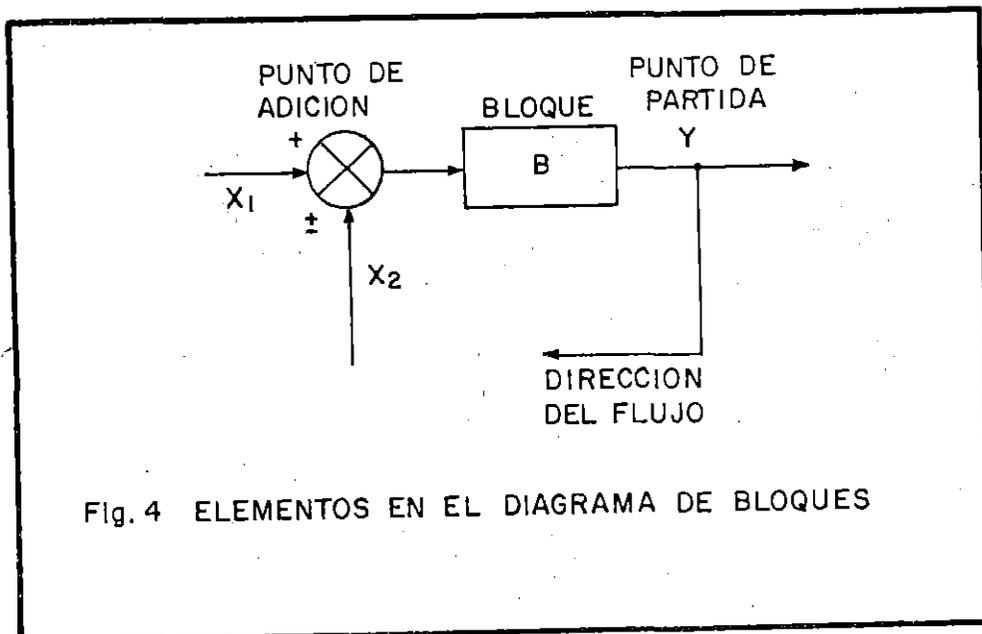


Fig. 4 ELEMENTOS EN EL DIAGRAMA DE BLOQUES

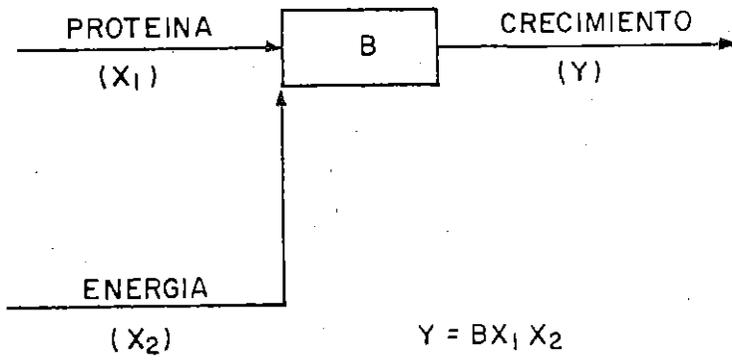
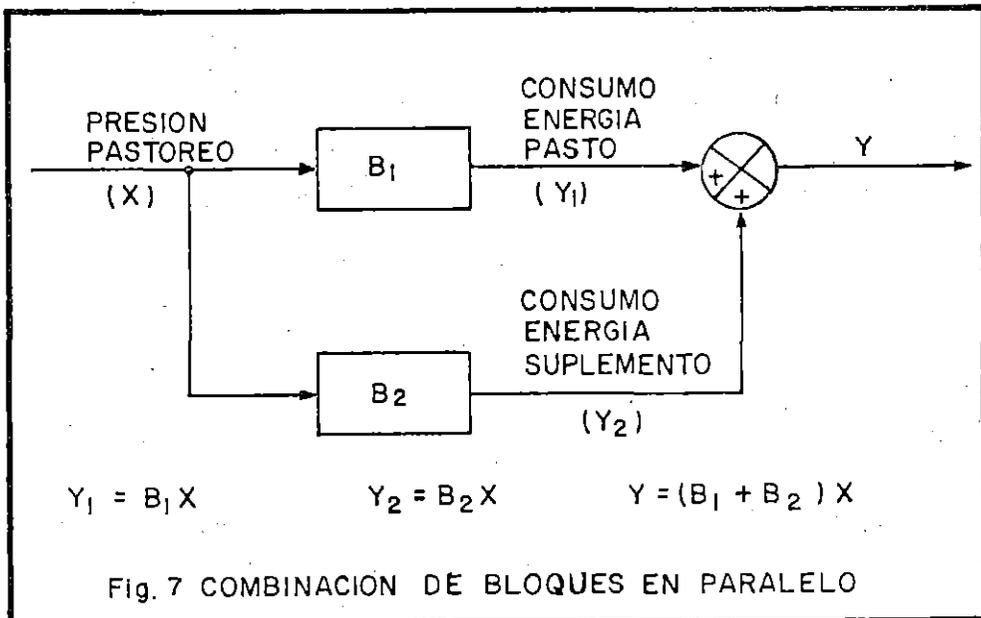
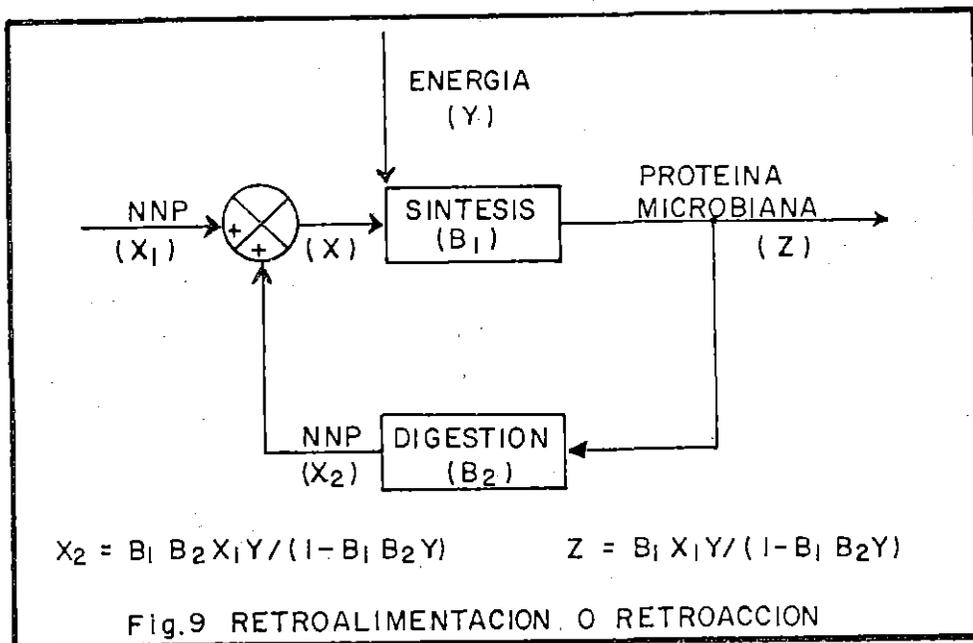
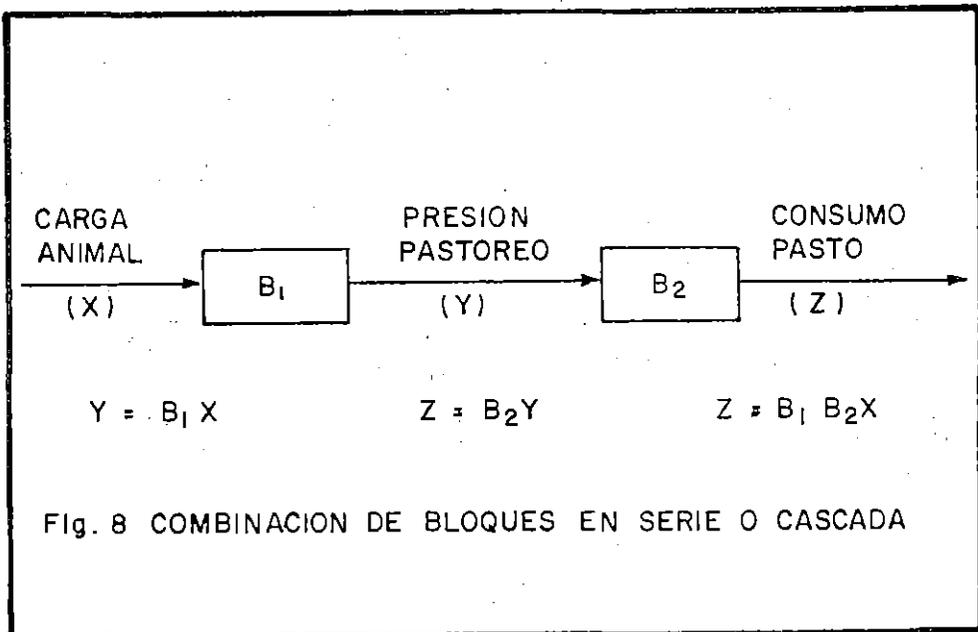


Fig. 6 COMBINACION NO ADITIVA DE ENTRADAS







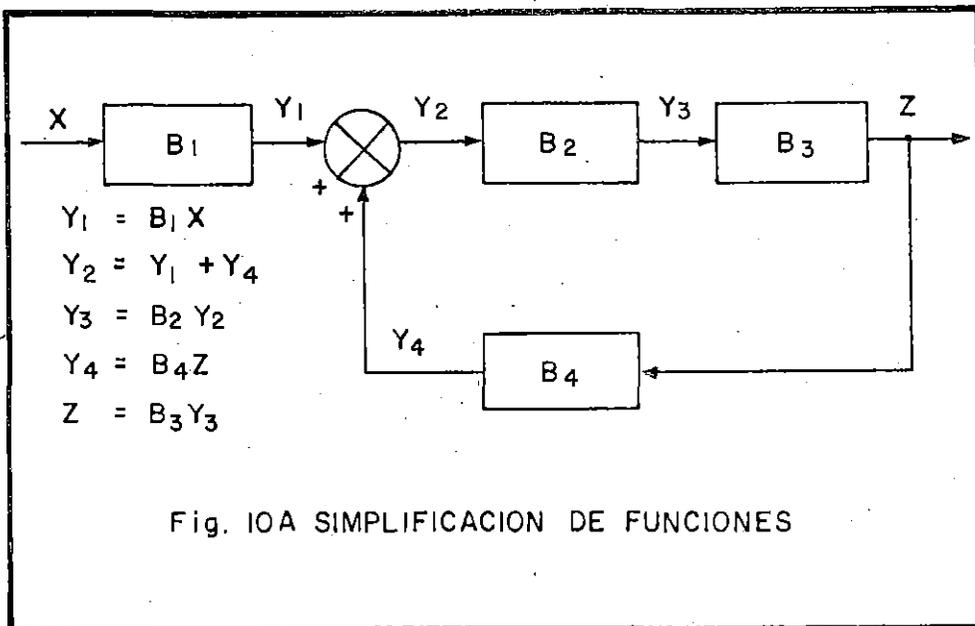
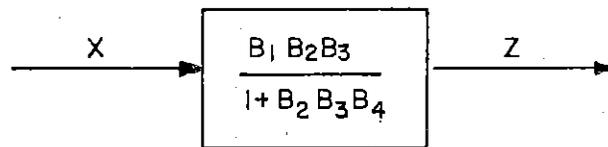


Fig. IOA SIMPLIFICACION DE FUNCIONES



$$Z = X \frac{[B_1 B_2 B_3]}{[1 + B_2 B_3 B_4]}$$

Fig. 10 B SIMPLIFICACION DE FUNCIONES

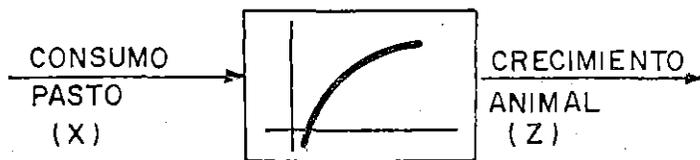


Fig. II A CRECIMIENTO ANIMAL EN FUNCION  
DEL CONSUMO DE PASTO. MODELO  
SIMPLIFICADO

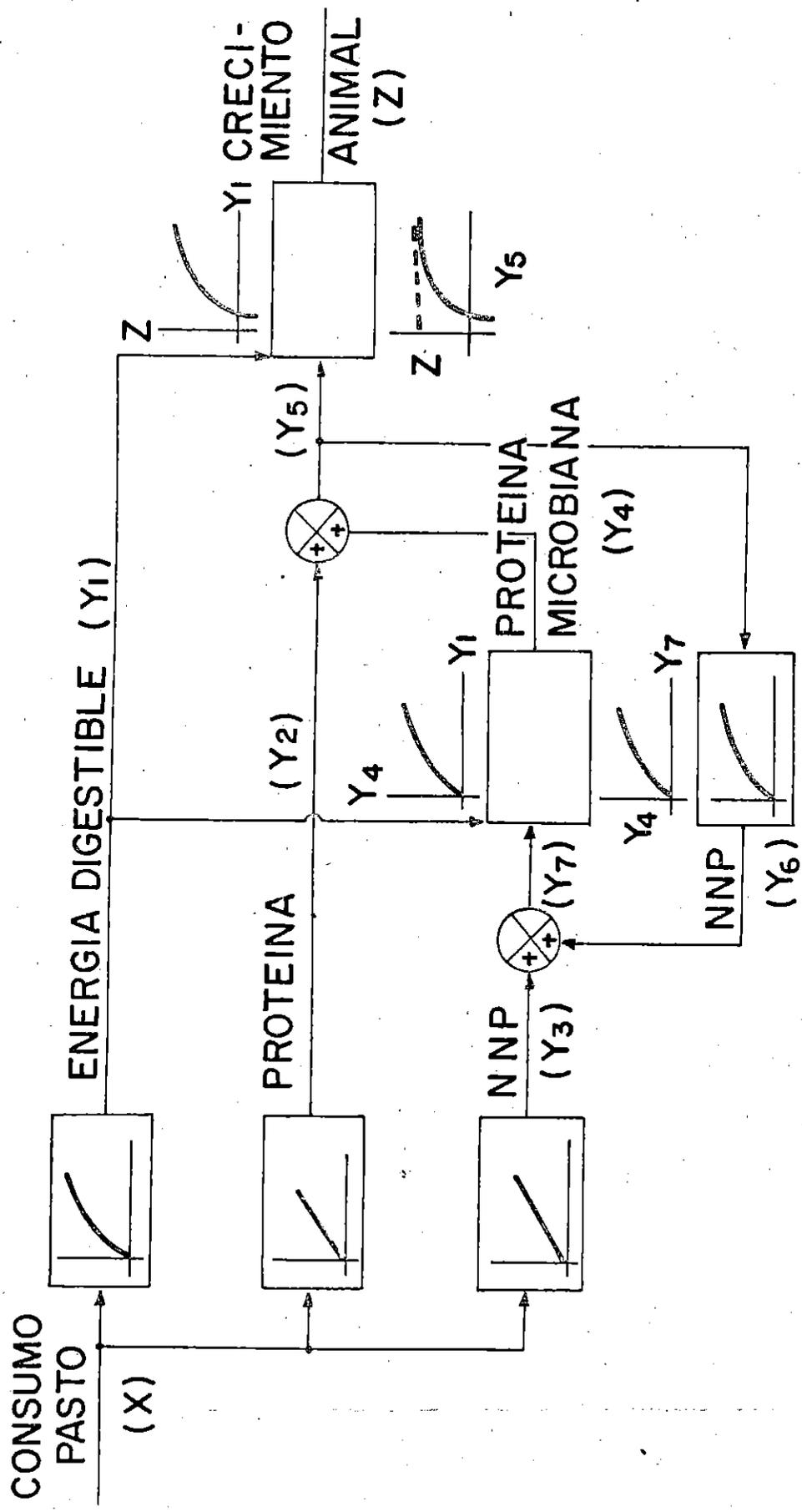
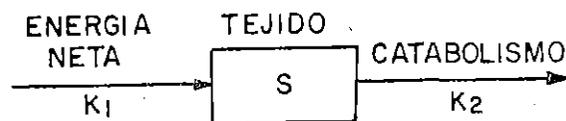


Fig. 11B CRECIMIENTO ANIMAL EN FUNCION DEL CONSUMO DE PASTO.  
 MODELO EXPANDIDO



$$\frac{ds}{dt} = K_1 - K_2 Y$$

Fig. 12 CAMBIOS EN EL SISTEMA S CON  
RELACION A LA VARIABLE TIEMPO

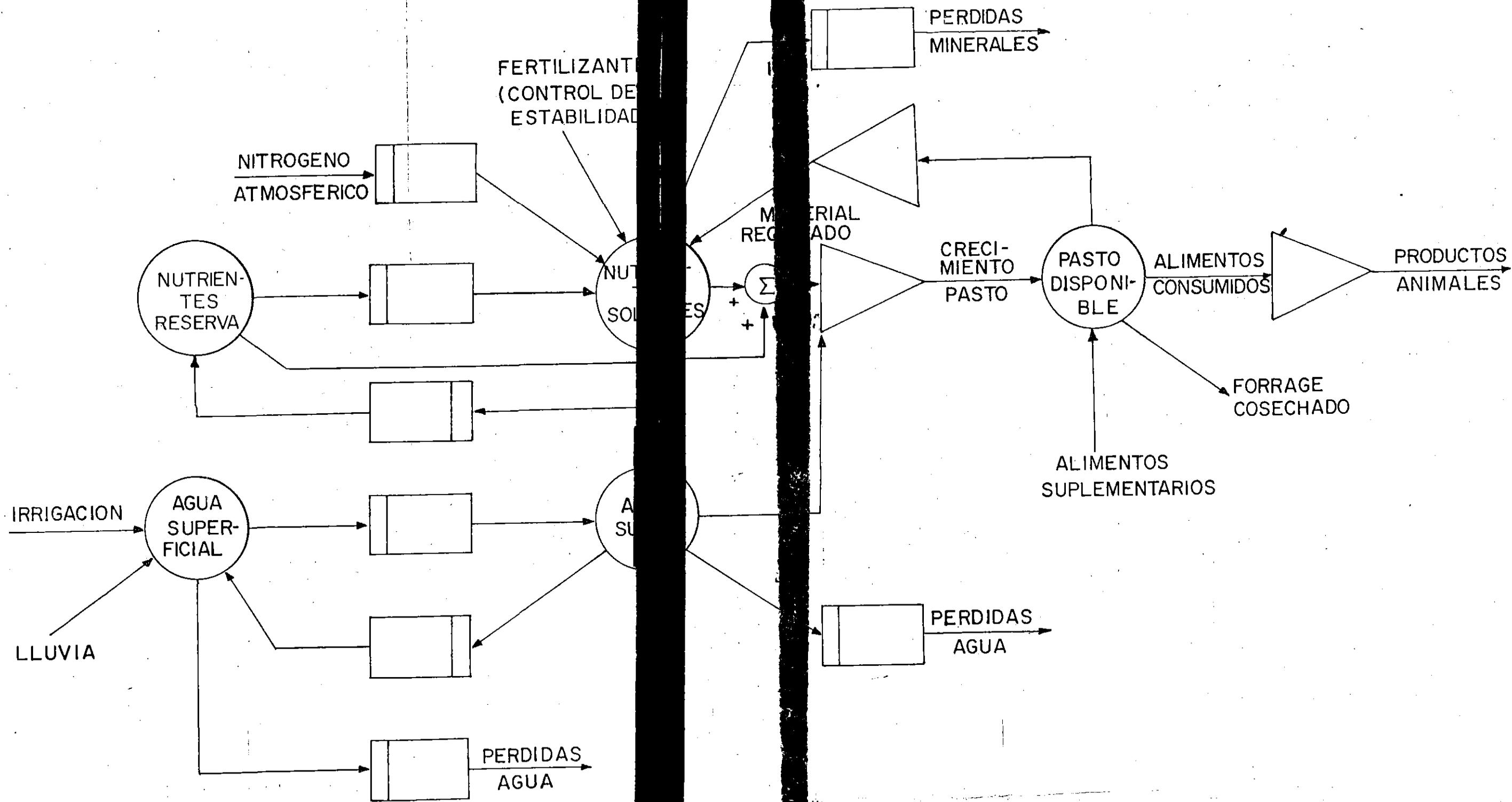


Fig. 13 SISTEMA DE PRODUCCION Y UTILIZACION DE PASTURAS MEDIANTE GANADO BOVINO

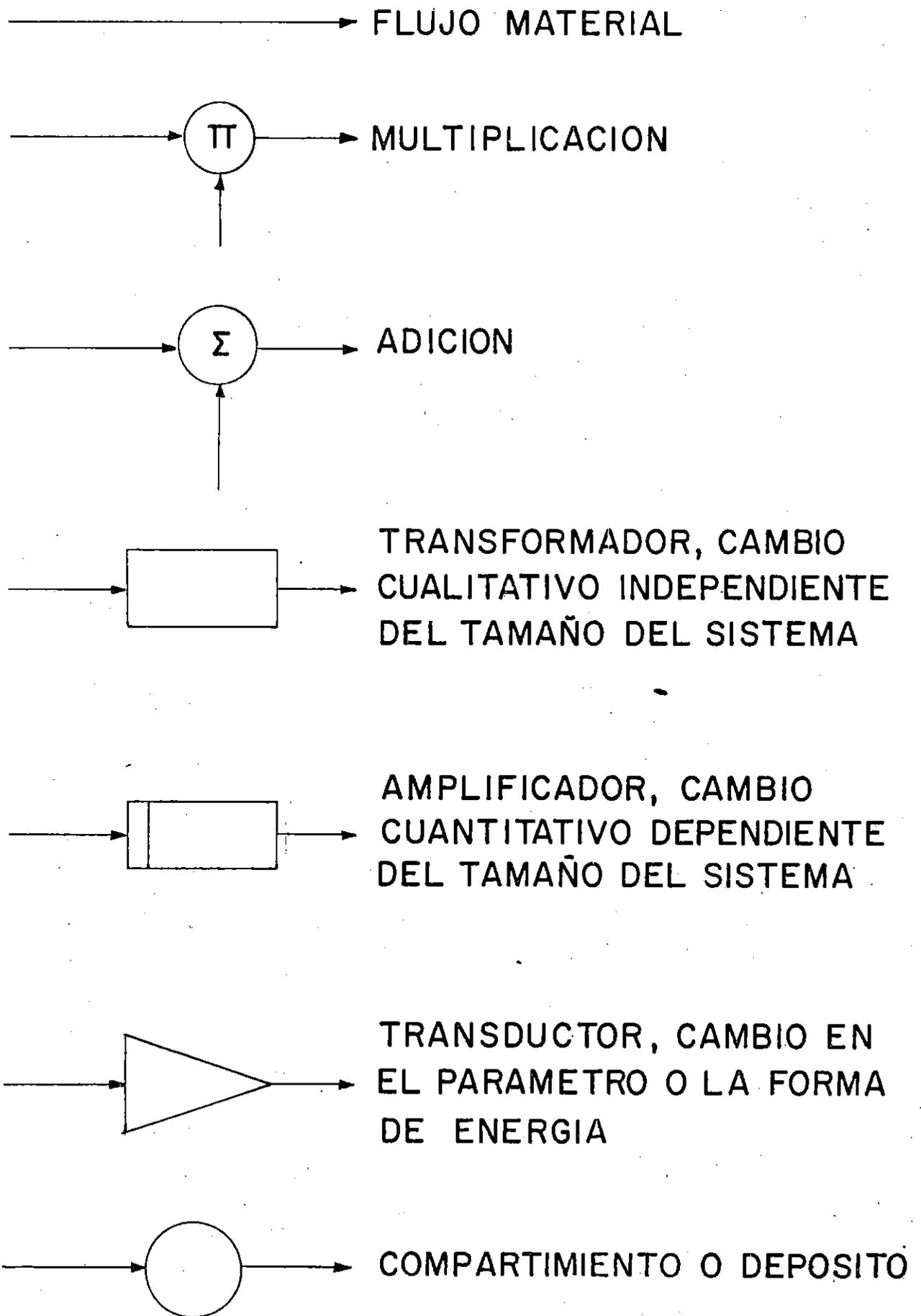


Fig. 14 SIMBOLOGIA

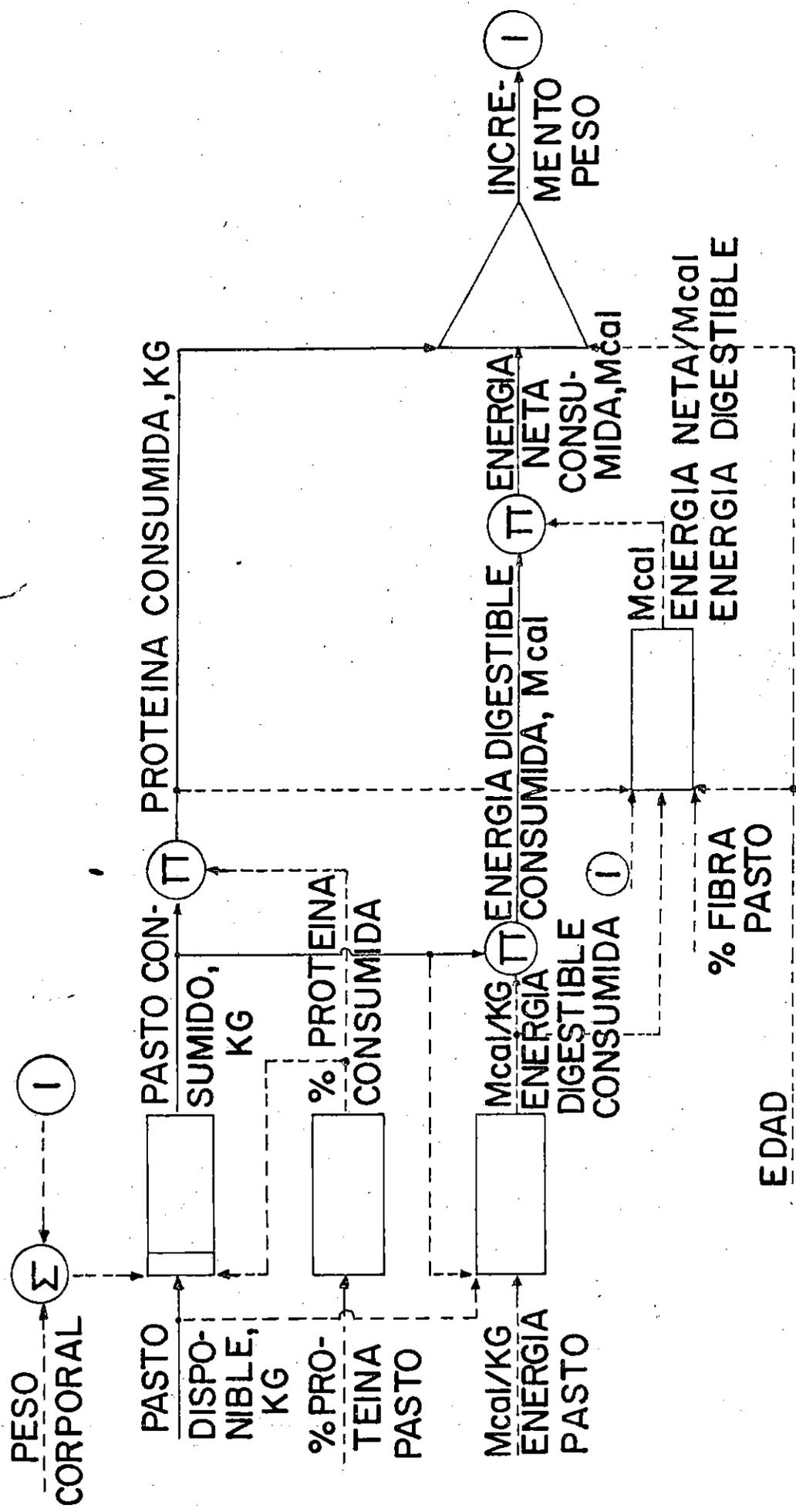


Fig. 15 EL SISTEMA ANIMAL COMO TRANSDUCTOR

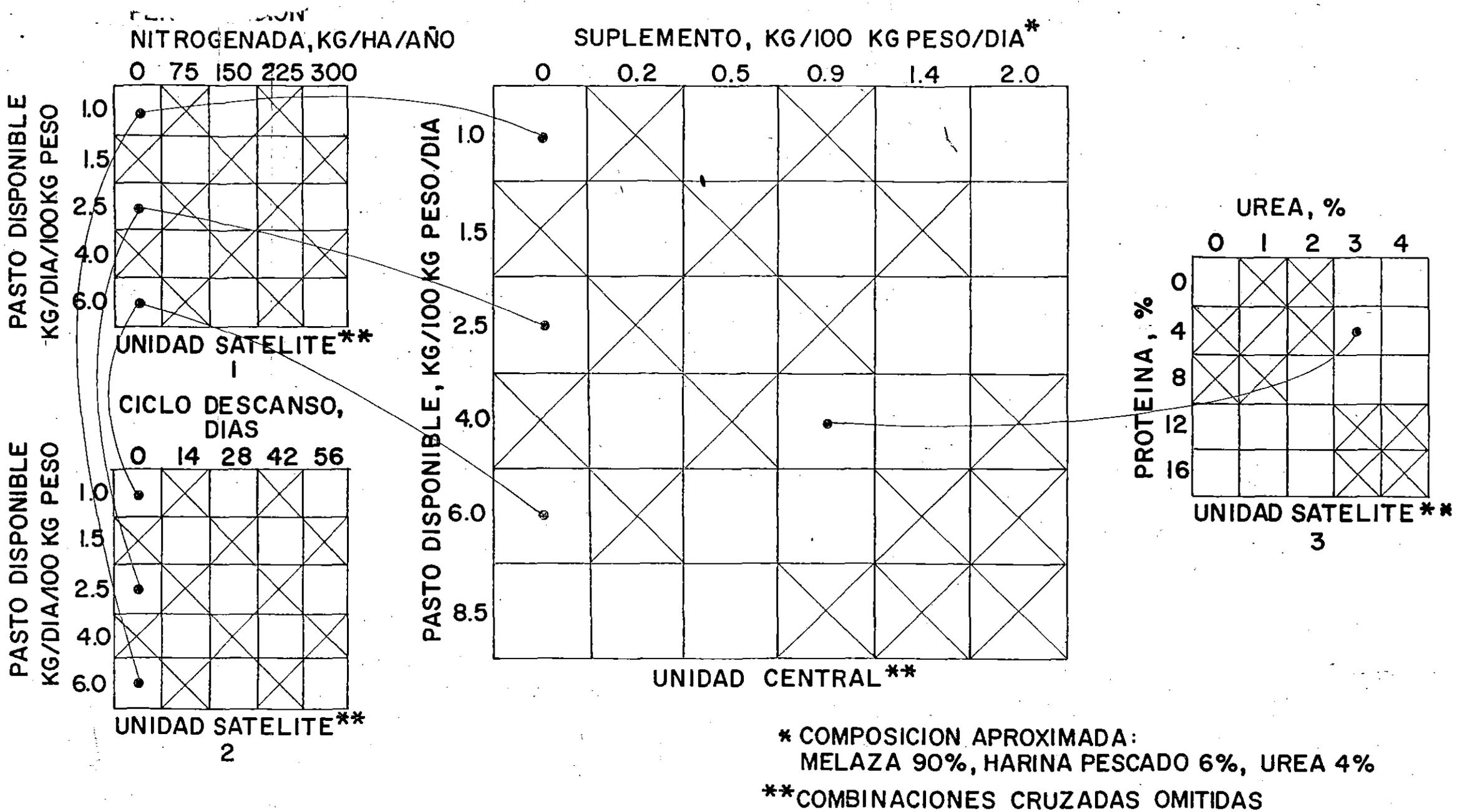


Fig. 16 DISEÑO DE CAMPO APLICADO A LA INVESTIGACION SISTEMICA

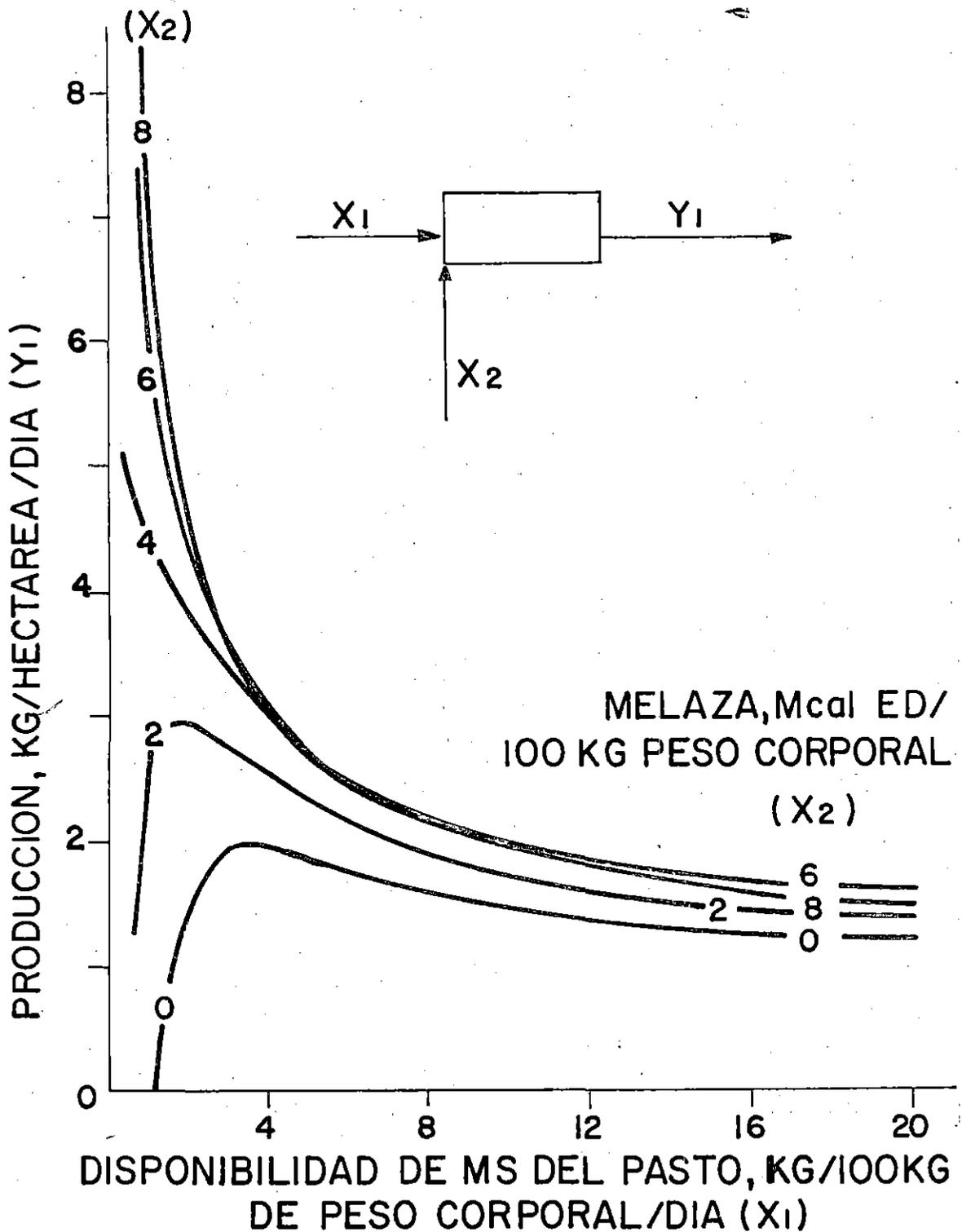


Fig. 17 PRODUCCION ANIMAL POR UNIDAD DE  
 AREA EN FUNCION DE LA DISPONIBILIDAD  
 DE PASTO, SUPLEMENTACION ENERGETICA  
 Y UREA

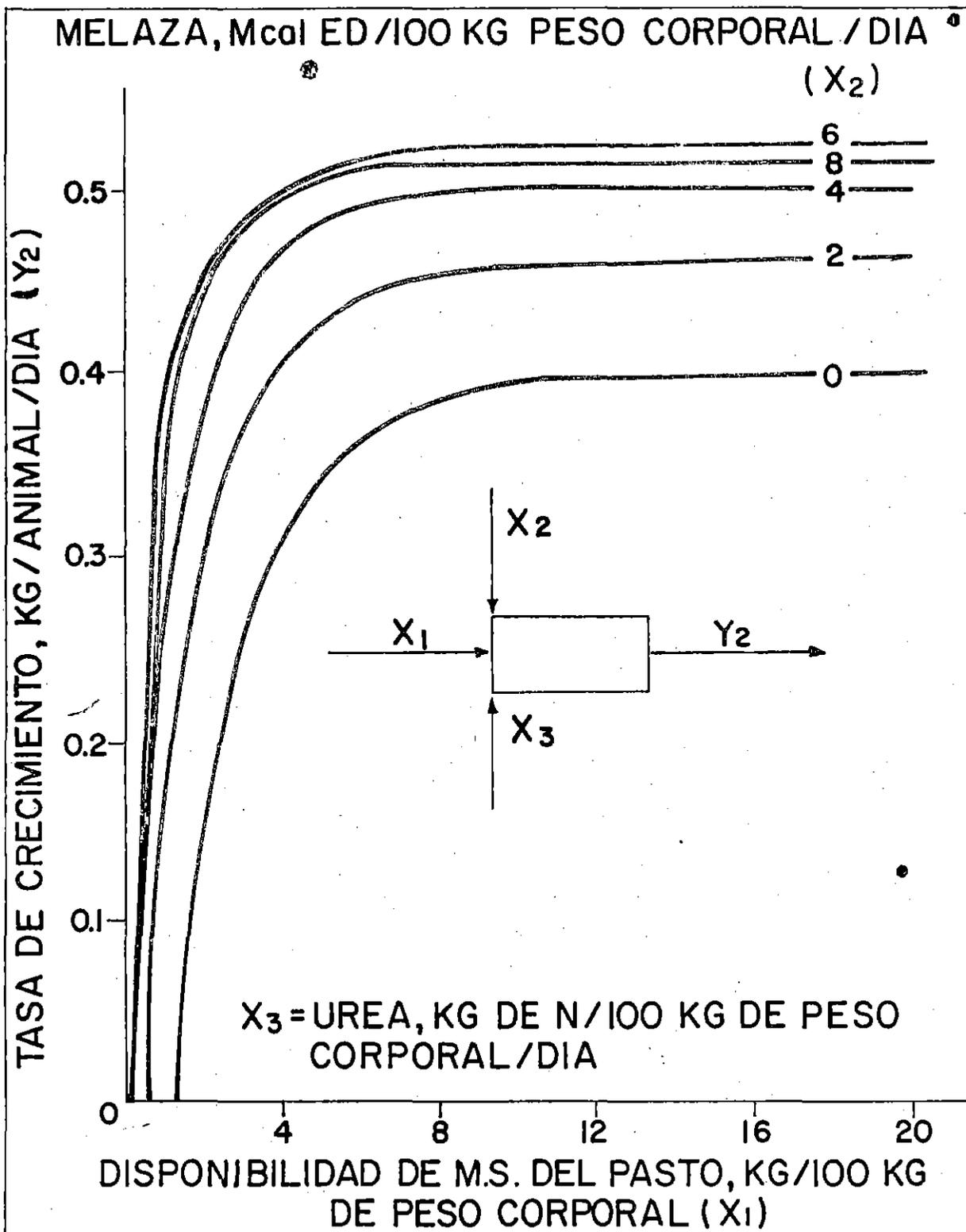


FIG. 18 INCREMENTO DE PESO EN FUNCION DE LA DISPONIBILIDAD DE PASTO, SUPLEMENTACION ENERGETICA Y UREA

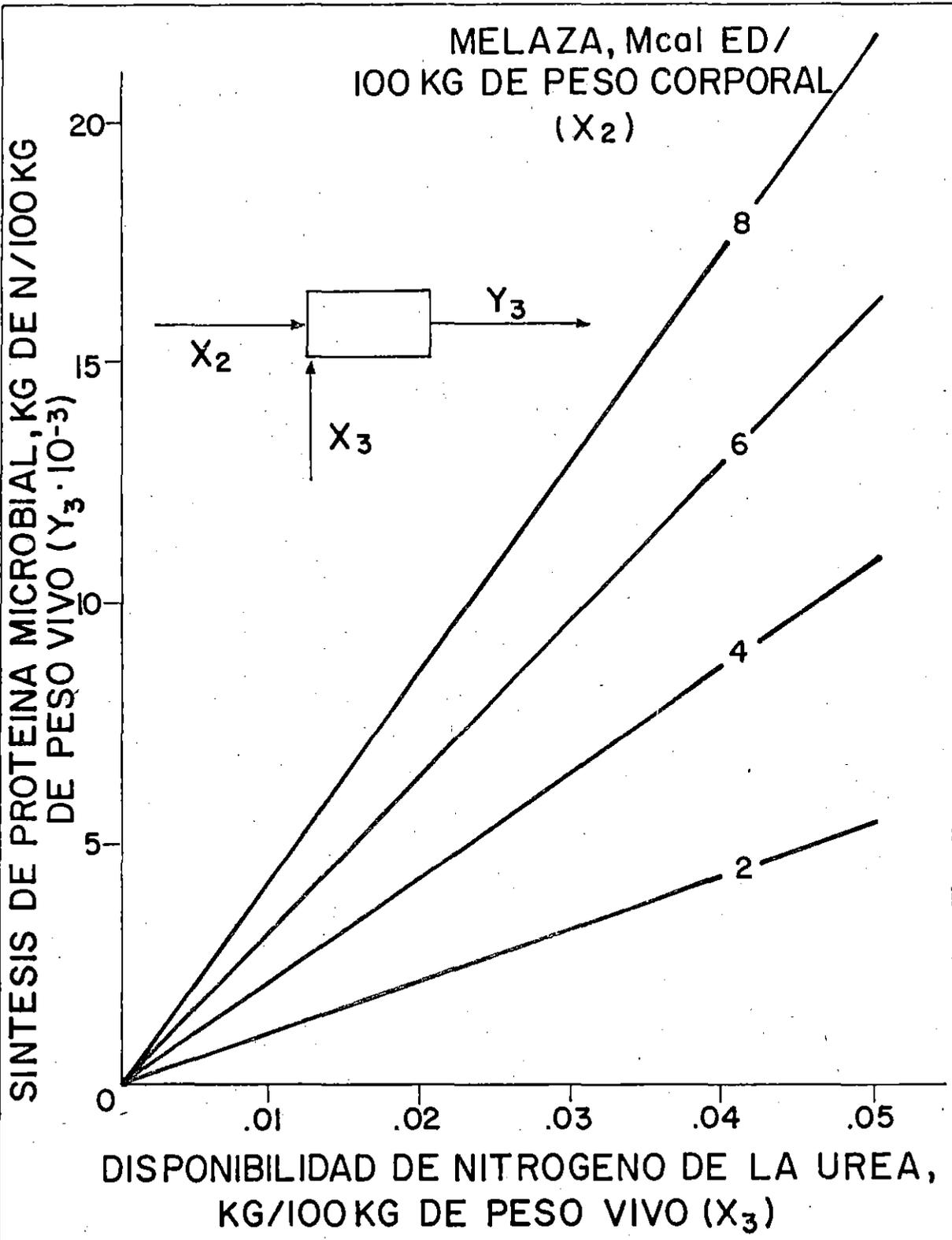


FIG.19 CAPACIDAD DE SINTESIS DE PROTEINA MICROBIAL EN FUNCION DE LA SUPLEMENTACION ENERGETICA Y UREA

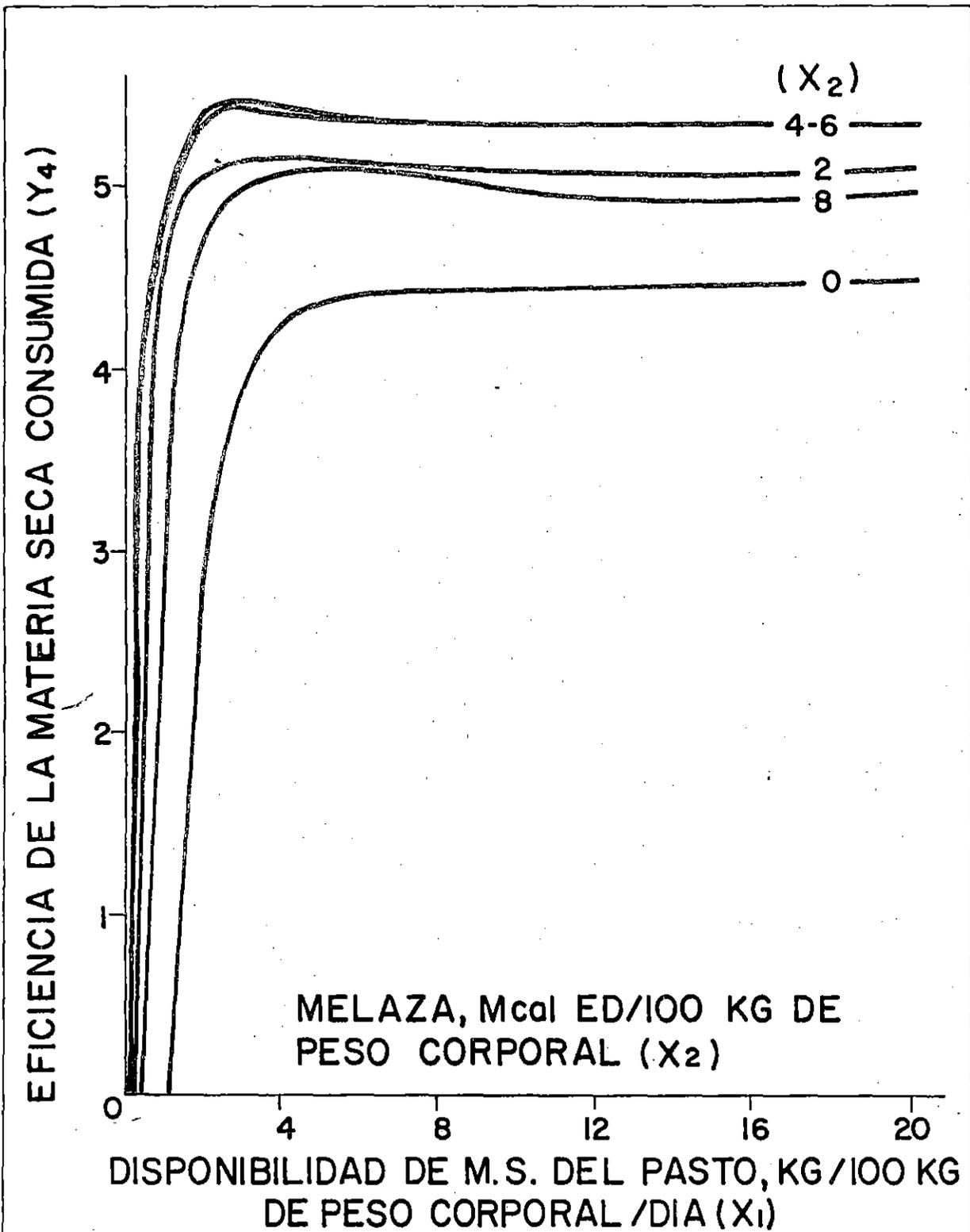


FIG.20 EFICIENCIA DE LA MATERIA SECA CONSUMIDA EN FUNCION DE LA DISPONIBILIDAD DE PASTO Y SUPLEMENTACION ENERGETICA