

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FLUJOS DE ENERGIA Y CALIDAD DE SITIO EN
SISTEMAS AGRICOLAS DE SUBSISTENCIA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa
Conjunto de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y
Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica y el
Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para
optar al grado de

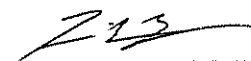
Magister Scientiae

por

VIVIANA PALMIERI REYMOND

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
Departamento de Producción Vegetal
Turrialba, Costa Rica
1985

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito para optar al grado de Magister Scientiae.



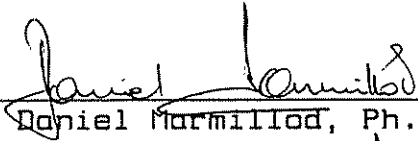
Tomás Schlichter, Ph.D.

Profesor Consejero



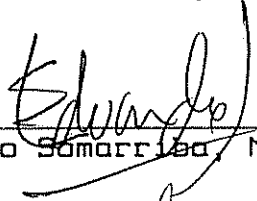
José Arze, M.S.

Miembro del Comité



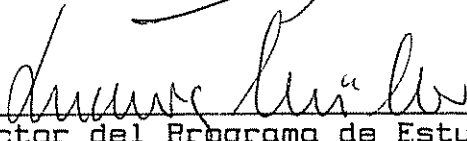
Daniel Marmillod, Ph.D.

Miembro del Comité




Eduardo Samarriba, M.S.

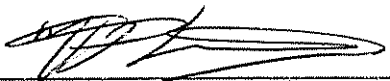
Miembro del Comité



Director del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales UCR-CATIE



Decano del Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad de Costa Rica



Viviana Palmieri R.
Candidata

I N D I C E

Resumen	v
Abstract.....	vii
Lista de Cuadros.....	ix
Lista de Figuras.....	xi
Introducción.....	1
Revisión de Literatura.....	3
1. Análisis energético.....	3
1.1. Justificación.....	3
1.2. Algunos resultados.....	6
2. Evaluación de sitios.....	9
2.1. Generalidades.....	9
2.2. Procedimientos.....	11
Materiales y Métodos.....	16
1. Recopilación de la información.....	16
2. Procedimiento de análisis.....	18
2.1. Transformación a unidades energéticas.....	18
2.2. Análisis de las variables de sitio.....	20
2.2.1. Análisis de componentes principales.....	21
2.2.2. Correlaciones.....	22
2.2.3. Regresiones múltiples.....	22
2.3. Relaciones entre calidad de sitio, energía invertida y producción.....	26
Resultados y Discusión.....	28
1. Características de los datos.....	28
2. Variables de sitio.....	34
2.1. Análisis de componentes principales.....	34
2.2. Correlaciones.....	39
2.3. Calidad de sitio.....	42

3. Relaciones entre calidad de sitio, energía invertida y producción.....	56
3.1. Relación entre energía invertida y producción....	56
3.2. Relación entre calidad de sitio y producción.....	64
3.3. Relación entre calidad de sitio y energía invertida.....	66
3.4. Relación entre la calidad de sitio, la energía invertida y la producción.....	68
3.5. Estimación de la calidad de sitio con variables medidas rutinariamente.....	77
Conclusiones y Recomendaciones.....	81
Literatura Citada.....	84
Apéndice.....	91

RESUMEN

Se analizaron datos de suelo, clima, manejo y producción de diversos sistemas de cultivo de subsistencia centroamericanos con el objeto de desarrollar modelos que explicaran el rendimiento en función de la calidad de sitio y de la energía invertida. La variable "calidad de sitio" se obtuvo mediante la aplicación de técnicas de análisis multivariado (componentes principales, regresión múltiple, etc.) a los datos de suelo y clima, de modo tal de representar en una sola dimensión al ambiente físico, con la mínima pérdida de información y la máxima relación posible con el rendimiento. La característica más importante para este eje resultó ser el clima, o sea temperatura y precipitación, en forma directamente proporcional. La variable "energía invertida" se obtuvo mediante la transformación a unidades energéticas de los insumos y el trabajo invertidos en los sistemas de cultivo.

El modelo de mejor ajuste entre energía cosechada (y), calidad de sitio (z) y energía invertida (x) fue de la forma: $y = \alpha_0 + \alpha_1 x - \alpha_2 x^2 + \alpha_3 z + \alpha_4 xz$ ($R^2 = 0,57$; modelo y parámetros estadísticamente significativos, $p < 0,001$) y permitió las siguientes conclusiones: a) en una calidad de sitio dada, la respuesta a la energía invertida fue cuadrática;

b) en cualquier nivel de energía invertida, una mayor calidad de sitio produjo mayor rendimiento y c) a mayor calidad de sitio, mayor respuesta a la inversión de energía.

Este trabajo aportó tanto el método de análisis, reproducible en su totalidad, como formas simplificadas de estimar la calidad de sitio, para desarrollar modelos que brinden pautas para planificar la actividad agrícola según criterios energéticos.

A B S T R A C T

Energy flows and site quality in subsistence cropping systems. Soil, climate, input and production data corresponding to different Central American subsistence cropping systems were analyzed with the purpose of developing models to explain yield as a function of site quality and energy inputs. To evaluate and quantify the site quality, multivariate analysis techniques (principal component analysis, principal component regression, multiple regression) were applied to soil and climate properties, in such a way as to represent the characteristics of the physical environment in a single dimension, with the least loss of information and the highest possible relationship with yield. Temperature and rainfall were the most important environmental properties in the site quality indices. The other independent variable, total energy inputs, was obtained expressing all the system inputs in energy units.

The best regression model between energy yield (y), energy inputs (x) and site quality (z) proved to be of the form: $y = \alpha_0 + \alpha_1 x - \alpha_2 x^2 + \alpha_3 z + \alpha_4 xz$ ($R^2=0.57$; highly significant model and parameters, $p<0.001$). Several conclusions can be drawn: a) for any given site quality, the

yield response to energy inputs was quadratic; b) for each input level, a higher site quality index corresponded to higher yields; and c) yield response to energy inputs was greater in high quality sites.

This thesis provides a description of the analytical methods used, as well as simplified ways to estimate site quality in similar environments. An estimation of this index would be useful for the future development of similar models in studies directed towards planning agricultural activities according to energetic criteria.

LISTA DE CUADROS

Nº	Título	Pg
1.	Características de la información recolectada: procedencia y número de datos.....	17
2.	Equivalencias utilizadas para transformar los flujos de los sistemas agrícolas en unidades energéticas.....	19
3.	Algunas características de los datos, agrupados a nivel de zona (máximo grado de agregación), ordenados según la temperatura.....	30
4.	Variables incluidas en el estudio.....	33
5.	Resultado parcial del análisis de componentes principales de las variables de suelo y clima a nivel de sitio (n=186).....	35
6.	Resultado parcial del análisis de componentes principales de las variables de suelo y clima a nivel de área (n=59).....	36
7.	Resultado parcial del análisis de componentes principales de las variables de suelo y clima a nivel de zona (n=18).....	37
8.	Matriz de correlación entre las variables de suelo y clima a nivel de sitio (n=186).....	40
9.	Correlaciones entre las variables de sitio y las de respuesta.....	43
10.	Correlaciones entre los componentes principales y las variables de cultivo.....	46
11.	Regresiones entre las variables de respuesta y las variables de sitio escogidas según la matriz de correlación. Los modelos escogidos definieron los diferentes ejes de calidad de sitio.....	48
12.	Regresiones entre las variables de respuesta y los componentes principales que caracterizan al sitio. Los modelos escogidos definieron los diferentes ejes de calidad de sitio.....	50
13.	Resumen de descripción de las 27 escalas de calidad de sitio y correlación de éstas con la respuesta de los sistemas de cultivo.....	53

14. Promedios generales de las variables de cultivo (n=365).....	58
15. Coeficientes de correlación lineal entre algunas variables de cultivo.....	59
16. Promedios de energía invertida y producida en cada sistema de cultivo.....	65
17. Variantes del modelo general $Y = A_0 + A_1X + A_2X^2 +$ $+ A_3Z + A_4XZ$ (donde Y es la energía producida, X es la energía invertida y Z es la calidad de sitio).....	70
A1. Coeficientes de correlación entre las variables de suelo y clima y los componentes principales.....	92
A2. Matriz de correlación entre las variables de suelo y clima a nivel de área (n=59).....	93
A3. Matriz de correlación entre las variables de suelo y clima a nivel de zona (n=18).....	94
A4. Análisis de componentes principales de algunas varia- bles de cultivo (n=365).....	95

L I S T A D E F I G U R A S

Nº	Título	Pg
1.	Distribución de frecuencias de las zonas de vida en cada piso altitudinal.....	29
2.	Distribución de frecuencias de algunas variables de sitio.....	32
3.	Representación gráfica de los modelos exponenciales de eficiencia.....	62
4.	Relación entre la calidad de sitio y la energía invertida en algunos sistemas agrícolas de subsistencia.....	67
5.	Representación gráfica del modelo: $Y = - 2871,61 + 4,57 X - 0,002 X^2 + 0,69 Z + 0,0004 XZ$	71
6.	Representación gráfica del modelo: $Y = 738,11 + 6,79 X - 0,001 X^2 + 301,40 Z - 0,045 XZ$	73
7.	Relación entre la entrada de energía y la eficiencia en cada intervalo de calidad de sitio.....	78

I N T R O D U C C I O N

El crecimiento de las plantas y, por lo tanto, el rendimiento de los cultivos (Y) puede considerarse como el resultado del ambiente (A) y del manejo (M) de tal forma que $Y=f(A,M)$ (69). Una manera de estudiar esta relación es cuantificar ambas variables independientes.

El ambiente, conformado por las propiedades del suelo y las características del clima puede ser ordenado según una o varias cualidades que se consideren relevantes (21,28,29,30,31,64). El ordenamiento de los sitios según su capacidad productiva, denominado aquí calidad de sitio, permite expresar numéricamente al ambiente para incluirlo en la función de producción mencionada.

El manejo comprende los insumos y las actividades que el agricultor decide introducir o realizar en el sistema durante el proceso de producción. Una forma de expresar esto en una sola unidad es mediante la transformación a energía. Dado que el crecimiento y desarrollo de todos los seres vivos es un proceso termodinámico en el que el incremento del orden y la disminución de la entropía del sistema es posible en virtud de la entrada al mismo de energía de una fuente externa (54) y como la agricultura es el medio más importante del hombre

para explotar la energía que se almacena continuamente en la producción primaria de las plantas (56) resulta tanto posible como lógico cuantificar el manejo y el rendimiento en unidades energéticas.

Segun Zandstra (69), la atención del investigador debe enfocarse hacia la interacción entre el manejo y el ambiente para poder comprender su efecto sobre la producción de un sistema. Este criterio es compartido implícitamente por Hall (22) al exponer su teoría según la cual, para obtener un rendimiento dado, se requiere más energía en sitios de menor calidad.

El objetivo principal de este trabajo fue construir un modelo de regresión que permitiera explicar la producción de algunos sistemas agrícolas de subsistencia centroamericanos en función de la energía invertida y de la calidad del sitio. Esto, a su vez, permitiría disponer de métodos y pautas para planificar la actividad agrícola según criterios energéticos.

La satisfacción del objetivo principal requiere el cumplimiento de los siguientes objetivos secundarios: obtener una escala de calidad de sitio, con base en sus propiedades de suelo y clima, y lograr una evaluación energética de varios sistemas de cultivo centroamericanos.

REVISIÓN DE LITERATURA

1. Análisis Energético.

1.1 Justificación.

En las últimas décadas, la agricultura mundial se ha caracterizado por un uso creciente de tecnologías dependientes de combustibles fósiles para incrementar la productividad de los cultivos (31,32,35,38). Este hecho ha sido comprobado al estudiar series de tiempo tanto en países industrializados (32,35,38) como no industrializados (38). El incremento en la energía utilizada para la producción de alimentos en varios países entre los años 1959 y 1974 fue de 50 a 107% (38). En el mundo un 3,5% de la energía total se usa en la producción de alimentos (38). En los EEUU este valor es de 3% (39) y en China de 6,5% (36).

Black (37), en 1971, fue de los primeros en comparar sistemas agrícolas según su eficiencia energética tomando en cuenta la energía utilizada en plantar, cuidar y cosechar el cultivo, dada la necesidad de vigilar el gasto de energía proveniente de reservas finitas.

A partir de la "crisis de energía" fueron muchos los investigadores interesados en el balance energético de los cultivos. La crisis de energía (40), la escasez de recursos energéticos convencionales (33,34,35), el rápido incremento de su costo (33,35,48), la incertidumbre sobre su disponibilidad (43,48) y la preocupación acerca de la creciente dependencia de los sistemas de producción de alimentos de fuentes de energía no renovables (55) fueron las razones principales que indujeron el uso de técnicas de análisis energético para recalcar tanto la importancia crítica del uso de energía en agricultura como la eficiencia energética comparativa de sistemas agrícolas.

La energía es una unidad de medida más estable en el tiempo y en el espacio que las unidades monetarias (31) y su uso para evaluar sistemas de producción agrícola permite comparar cultivos del mismo tipo (cereales, por ejemplo) (40), analizar alternativas tecnológicas (33,35), medir los resultados de métodos agronómicos empleados (40) o determinar si se está invirtiendo energía excesiva para un rendimiento dado (32). Además, permite evaluar con mayor propiedad a las fincas de subsistencia, en las que no existe intercambio con el mercado (44).

Otros autores han enfatizado la utilidad del análisis energético a nivel macroeconómico. Larios (31) sugirió este análisis como criterio adicional importante en la orientación

de las políticas de investigación y fomento agrícola en los países latinoamericanos. Según Odum (42), el entendimiento del papel de la energía en el diseño de sistemas es un objetivo principal de la ciencia y un prerrequisito para la formulación de políticas razonables. Barrière y Berranger (3) justificaron el análisis energético de la producción agrícola dentro de la lógica del desarrollo de una agricultura más autónoma, menos frágil y más preocupada por su porvenir a largo plazo .

Pimentel y Pimentel (51) estimaron en 1980 que un 25% de la población mundial estaba mal nutrida y que prácticamente ya no había tierras de vocación agrícola sin cultivar. Si se considera, además, que la explotación agrícola para producir combustibles competirá en un futuro con la producción de alimentos (38), resulta claro que la única solución será aumentar los rendimientos por área. Pero la agricultura de alta producción, o intensiva, es actualmente sinónimo de un gran consumo de energía fósil (24). Incluso, según Boardman (7), no se puede considerar a la fotosíntesis como una fuente de energía renovable si no se logra el reciclaje de insumos no renovables, tales como fertilizantes.

El problema es mayor en los países en desarrollo. Hay que balancear el costo en divisas de los combustibles fósiles y el subempleo resultante de la tecnificación de la agricultura contra el deseo de un incremento absoluto en la producción de

alimentos (5). Según Jin y otros (27), en los trópicos es imposible depender de la energía comercial para el desarrollo de la agricultura, como en los países industrializados. Se han planteado algunas alternativas tales como el desarrollo de especies más eficientes en la producción de energía digerible (25), prácticas culturales con menos insumos (10,25), producción de metano a partir de residuos (14,27), etc. Pero, de acuerdo con los hechos apuntados, resulta lógica la necesidad de evaluar las estrategias según su gasto y rendimiento energético, sin olvidar que el uso de energía debe considerarse en relación al uso de otros recursos escasos (41).

1.2. Algunos resultados.

Fluck (18) distinguió dos métodos para analizar los flujos de energía. El primero consiste en examinar los flujos verdaderos o termodinámicos, incluyendo todas las formas de energía. En el segundo método, se permite por convención incluir el equivalente en combustible fósil de los diferentes flujos que entran al sistema, excluyendo la energía solar y a veces la muscular. Al final, la suma da la energía almacenada en el bien o servicio. Este es el método usado por analistas preocupados por la conservación de los recursos energéticos primarios (18).

El parámetro más utilizado para evaluar sistemas agrícolas desde el punto de vista energético es la razón entre salidas y entradas a los sistemas. Se expresa como peso (27, 62) o energía (25) producidos por unidad de energía invertida. Los valores de este parámetro, llamado "eficiencia", oscilan entre 1 a 2 (25,24) y 16 a 18 (5,25) en sistemas agrícolas.

Las variaciones de la eficiencia energética entre los sistemas de cultivo se deben a diversos factores. El más estudiado de éstos ha sido la entrada de energía, cuyo efecto es casi siempre negativo: a más energía invertida, menos eficiencia (5,25,34,46,47,48,49). La energía de fertilizantes fue el rubro más importante de las entradas en muchos estudios, constituyendo por ejemplo un 75% de las mismas en algunas comunas chinas (27). Según esto, un aumento en la eficiencia en el uso de fertilizantes puede tener repercusiones importantes en la eficiencia y rendimientos energéticos (27,34).

El uso de la tierra es otro factor importante. Van Hecke (24) observó que la relación entre salidas y entradas fue mayor a medida que la agricultura arable se hizo más importante, aumentando por un factor de cinco al comparar ganadería y hortalizas de invierno con granos. En El Salvador, Larios (34) observó eficiencias más altas en cultivos asociados que en monocultivos para cada nivel de insumos.

El efecto del tamaño de la finca sobre la eficiencia energética es variable. Según un estudio realizado en Nepal, las fincas grandes resultaron ser menos eficientes, drenando al ecosistema de su alrededor de más calorías por hectárea (2). Pero en los E.U.A se comprobó que en las fincas grandes la eficiencia energética fue mayor debido a un mayor cuidado en la cantidad de insumos aplicados y al uso de maquinaria especializada (23).

Hay estudios en los que se ha intentado ver el efecto que tendrá la disminución de la disponibilidad de energía en el futuro. En general, se coincide en que habrá un aumento en la eficiencia energética y se dan diferentes causas para esto. Por un lado, disminuirán las ventajas competitivas de sistemas basados en un uso intenso de energía (37,67). Así, los cultivos "de lujo", de alto valor económico que requieren gran inversión, serán los primeros en ser no rentables (42) y aún en los cultivos alimenticios disminuirá el uso de fertilizantes, pesticidas y riego, lo cual resultará en una menor producción (13) aun con técnicas de "agricultura orgánica" (52). En países tropicales, se tenderá a los métodos agrícolas tradicionales, de bajo costo y rendimiento, con lo cual la producción de alimentos podría bajar a niveles críticos (67). El mayor impacto será sentido por los pequeños agricultores, dado su menor acceso al financiamiento (51). Sólo en lugares como Nueva Zelanda, con baja densidad de pobla-

ción y una economía basada en la ganadería y en la producción de cereales en rotación con tréboles, o sea de requerimientos energéticos bajos (37), la situación no variará perceptiblemente. Sin embargo, algunos investigadores como Smil, Nachman y Long (62) consideraron que el aumento en la eficiencia energética de la producción agrícola se deberá a mejoras tecnológicas en la fabricación de insumos -sobre todo fertilizantes- y a un aumento en el tamaño de las fincas.

2. Evaluación de sitios.

2.1 Generalidades.

El concepto de calidad de sitio utilizado en este trabajo se definió como la capacidad relativa de un ambiente físico dado (suelo y clima) para la producción agrícola. Un sitio de mayor calidad tendrá mayor rendimiento para cada nivel de manejo que otro sitio. Esta capacidad productiva se evaluó para un uso determinado: los sistemas agrícolas de subsistencia centroamericanos.

En la literatura existen referencias a conceptos similares tales como calidad de tierra (22,45), determinada por el suelo, el clima, el paisaje y la ubicación (22) o el índice de sitio, medida biológica de crecimiento usada en las ciencias forestales (44). El potencial de producción

definido por Laker (33) es un poco más amplio, al incluir consideraciones socioeconómicas. Pero en la mayoría de los casos, las evaluaciones se realizan considerando sólo las propiedades del suelo, dando origen a conceptos tales como capacidad (31), potencial (57), productividad (21) y hasta fertilidad (10,57,64) del suelo. El objetivo de todos los anteriores es evaluar algunas características del ambiente para lograr una clasificación u ordenación de los sitios agrícolas.

Este intento por evaluar el ambiente se justifica por ser un principio básico para definir las políticas de uso de tierras agrícolas (33,45) y las prácticas de manejo más adecuadas para cada área (10,59,64). La evaluación puede ser usada por investigadores, políticos, extensionistas y agricultores (10) y provee criterios para racionalizar la información, de la cual depende en gran medida la eficacia de los órganos de dirección agrícola (43).

La fertilidad del suelo no es observable directamente y los suelos sólo pueden ser agrupados por inferencias (63). Esta consideración es válida para cualquiera de los otros índices usados para evaluar sitios (calidad, capacidad, etc.).

Otro problema importante al evaluar los sitios es la falta de información (4,21). La colección de datos en el levantamiento de suelos busca, en primer lugar, resolver problemas de clasificación de suelos (4) y los sistemas de clasifica-

ción, aunque son una herramienta valiosa (43), no siempre reflejan las prácticas de manejo adecuadas (10). Según Laker (33) los técnicos encargados de esta actividad deben dar estimados del rendimiento y una descripción del manejo para ese rendimiento. Además, se deben hacer intentos por sintetizar las propiedades relevantes y medibles del suelo en factores que tienen influencia sobre los procesos agrícolas, el manejo y la respuesta a insumos (4). Estos factores constituyen los "criterios diagnóstico" (21) o "calidades de la tierra" (4).

2.2. Procedimientos.

Los procedimientos utilizados para evaluar sitios son de dos tipos: de clasificación y de ordenación. Entre los primeros se destaca el sistema de clasificación de la capacidad del suelo según su fertilidad, diseñado para agrupar suelos con las mismas limitaciones en el manejo de la fertilidad (10,61), cuya utilidad ha sido comprobada bajo condiciones muy diversas (61). Con el mismo objetivo, Sanchez y Buol (59) propusieron dividir los suelos tropicales según su contenido de bases en altos y bajos y definieron las prácticas de manejo para cada categoría. Estas dos formas de clasificar los suelos tienen en común que su fin es guiar las prácticas de manejo y que no fueron desarrolladas para ningún cultivo en particular.

Otros sistemas de clasificación procuran dar pautas para definir el cultivo más apropiado en cada sitio. Frotz (55) agrupó los cultivos con requerimientos similares en cuanto a características del suelo y luego definió el rango adecuado de diez propiedades para cada grupo de cultivos. De La Rosa y Almorza (58) lograron un programa para automatizar la clasificación en clases de capacidad para diversos cultivos. Al entrar los datos de suelo al programa, sale para cada cultivo el número de la clase de capacidad y los factores limitantes (58). Estas dos últimas clasificaciones son basadas en conocimientos previos sobre las condiciones óptimas para los diferentes cultivos.

Hay clasificaciones que utilizan el desempeño de un cultivo como indicador de la calidad del sitio. Brito y colaboradores (9) clasificaron las plantaciones de pino (Pinus caribea) de una zona en buenas, regulares y deficientes según su crecimiento en altura y luego relacionaron esta clasificación con las variables del suelo. En un estudio realizado en Ontario, se asignó un índice de productividad a cada unidad de mapeo de la clasificación de capacidad de suelo canadiense, basado en el rendimiento de maíz promedio para cada unidad (45). Estos autores demostraron que este índice de productividad, definido como calidad de tierra, se relacionó con la rentabilidad del cultivo de maíz (45).

Laker (33) hizo un tratamiento teórico acerca de la clasificación del potencial de suelos. Enfatizó la importancia de tomar en cuenta tanto el rendimiento como la respuesta a la tecnología para determinar el potencial para un uso dado.

De los métodos usados para ordenar sitios según su calidad o capacidad, la asignación de puntajes descrita por Gavriilyuk (21) es de los más simples. En cada zona, se expresan matemáticamente las propiedades naturales del suelo que correlacionan con el rendimiento de los cultivos principales y, según el valor de las mismas, se establece una graduación de los sitios.

Las técnicas del análisis multivariado han sido utilizadas por los ecólogos por más de una década para relacionar la respuesta de la vegetación, en cuanto a importancia (20) y distribución (66) de las especies, con los factores ambientales. En la evaluación de suelos, estas técnicas también han probado ser herramientas muy útiles. Un grupo de investigadores japoneses encabezados por Kyuma (28,29,30) desarrolló un método para evaluar la fertilidad de suelos para arroz inundado. Tomaron 23 variables relacionadas con la fertilidad e hicieron análisis de componentes principales (28), luego un análisis de factores (factor analysis) con rotación varimax y obtuvieron el puntaje de cada observación en los cuatro primeros factores (29). Posteriormente, realizaron una regresión

múltiple con los puntajes mencionados como variables independientes y el rendimiento como dependiente (30). Aseveraron que el rendimiento estimado con esta regresión es una medida de la fertilidad del suelo y con él graduaron los suelos (30).

El mismo grupo de investigadores evaluó la capacidad de suelos para arroz de secano (31,64). Las técnicas usadas fueron: regresión múltiple con variables de suelo escogidas según su correlación (31), análisis de factores y taxonomía numérica según la distancia entre las muestras en los factores (64). Kyuma (32) posteriormente escribió que estos métodos desarrollados para Japón son aplicables a los suelos del trópico si se agregan algunas propiedades relevantes en suelos tropicales.

Page (44) realizó una evaluación cuantitativa del potencial de sitio para dos especies forestales. En lugar de rendimiento, utilizó el índice de sitio como indicador o variable dependiente en las regresiones múltiples. Las variables independientes fueron las propiedades medidas del suelo o los componentes principales, los cuales facilitaron la interpretación biológica de las regresiones.

En ninguno de los métodos mencionados se consideró el nivel de insumos. Para poder incluir este factor, Beek (4) sugirió analizar en primer lugar la relación entre el rendi-

miento y las cualidades de la tierra; luego determinar la influencia de éstas sobre los insumos y por último un análisis de insumos versus rendimiento.

MATERIALES Y METODOS

1. Recopilación de la información.

Se reunieron datos de suelo, clima, manejo y producción de diferentes sistemas agrícolas de subsistencia en Centroamérica. Las principales fuentes de información utilizadas fueron proyectos de caracterización, extrapolación o validación de tecnología desarrollados por CATIE en Centroamérica (ver Cuadro 1).

Los archivos originales, a partir de los cuales se obtuvo el archivo utilizado, son inéditos. Se encuentran, en su mayoría, en el Centro de Computo del CATIE. Las publicaciones citadas en el Cuadro 1 corresponden a los informes en que cada uno de los proyectos reportó los resultados obtenidos a partir de los archivos en cuestión.

El muestreo fue por cuota, o sea que se tomaron todas las observaciones disponibles para cada localidad y cada sistema de cultivos. Esta decisión se tomó porque en ningún caso el número de observaciones en cada sistema y cada localidad superó los 40 datos, límite a partir del cual el muestreo sería aleatorio.

CUADRO 1. Características de la Información Recolectada: Procedencia y Número de Datos

País	Municipio o Cantón	Proyecto	Cita bibliográfica	Número de	
				Sitios	Parcelas
Costa Rica	Acosta	CATIE/GTZ	53	29	29
	Puriscal	CATIE/GTZ	53	6	6
	San Carlos	*	-	5	7
	Guácimo	CATIE/IPPC	16	7	31
	Cariari	CATIE/IPPC	16	19	70
Nicaragua	Suni	CATIE/GTZ	65	15	15
	Sisle	CATIE/GTZ	65	6	6
	Los Robles	CATIE/GTZ	65	12	12
	Condega	CATIE/CEE	11	9	10
	Estelí	CATIE/CEE	11	11	12
	La Trinidad	CATIE/CEE	11	17	17
	Pueblo Nuevo	CATIE/CEE	11	12	13
El Salvador	Ahuachapan	CATIE/Extrapolación	12	7	28
	Chalatenango	CATIE/Extrapolación	12	7	28
	La Paz	CATIE/Extrapolación	12	2	8
	Morazán	CATIE/Extrapolación	12	4	16
Guatemala	Jutiapa	CATIE/Extrapolación*	12	12	36
	Santa Rosa	CATIE/Extrapolación	12	6	21

*Datos inéditos facilitados por alumnos del curso Agroecosistemas I, CATIE 1984.

Para ser incluido dentro del archivo, cada sitio (unidad representada por el análisis de suelo, puede incluir dos o más parcelas) debió contar con datos de clima, propiedades químicas y físicas del suelo y pendiente. Las variables definitivas que se usaron dependieron de la información disponible y, por ser la recopilación de la misma parte del estudio, se detallaron en el capítulo de Resultados. A su vez, la información necesaria para incluir una parcela comprendió insumos, mano de obra, duración del ciclo de cultivo, densidad de siembra, rendimiento y área. La parcela se definió como una porción del sitio en que el sistema de cultivo fue homogéneo.

El tipo de información recopilada correspondió a parcelas sembradas en la finca, manejadas generalmente por los agricultores, utilizando su tecnología, alguna recomendación tecnológica o ambas.

2. Procedimiento de análisis.

2.1. Transformación a unidades energéticas.

Las entradas (insumos, trabajo) y las salidas (rendimiento) a cada sistema se transformaron en unidades de energía según las equivalencias anotadas en el Cuadro 2. En general, el criterio utilizado fue el siguiente: el contenido energé-

CUADRO 2. Equivalencias Utilizadas para Transformar los Flujos de los Sistemas Agrícolas en Unidades Energéticas

Producto	Unidad	Energía Equivalente (Mcal/unidad)	Referencia
Herbicidas:			
Diurón	kg i.a./ha	70,06	50
Atrazina	kg i.a./ha	51,01	50
Paraquat	kg i.a./ha	115,29	50
2,4-D	kg i.a./ha	67,11	50
2,4,5-T	kg i.a./ha	99,61	50
Glifosato	kg i.a./ha	120,21	50
Insecticidas:			
Carbofuran G	kg i.a./ha	138,42	50
Foxim G	kg i.a./ha	74,30	50
Foxim E	kg i.a./ha	86,91	50
Metil-paration E	kg i.a./ha	56,72	50
Picloram E	kg i.a./ha	86,91	50
Fungicidas:			
Polvos mojables	kg i.a./ha	28,98	50
Conc. emulsificables	kg i.a./ha	66,12	50
Fertilizantes:			
Nitrógeno	kg N/ha	19,12	35
Fósforo	kg P ₂ O ₅ /ha	3,35	35
Potasio	kg K ₂ O/ha	2,15	35
Trabajo:			
Humano	Horas/ha	0,35	-
Bueyes	Horas/ha	2,40	34
Tractor (arar)			
-Si hay dato combustible	l/ha	14,39	35
-Si no hay dato combustible	ha	282,00	35
Cosecha:			
Maíz (grano)	kg/ha	3,61	36
Frijol, vigna (grano)	kg/ha	3,37	36
Sorgo (grano)	kg/ha	3,34	36
Yuca (raíz)	kg/ha	1,32	36

tico de los agroquímicos corresponde a la energía utilizada en su elaboración (35,50) según el concepto de energía almacenada en el bien (18). La equivalencia para los productos agrícolas corresponde a la energía de los enlaces químicos de la biomasa cosechada. Para transformar el trabajo se utilizó un valor promedio aproximado ya que, en muchos casos la información original no permitió analizar por separado cada tarea. En el caso de las semillas, el valor fue diferente según los cultivares: para la variedad "criolla" o local, se utilizó directamente la energía química de la semilla; para variedades mejoradas e híbridos se multiplicó la energía química por un factor para compensar por la energía adicional requerida para producir un cultivar mejorado. Esta energía adicional no ha sido cuantificada en forma precisa pero se refleja en el precio de las semillas. Con base en esto, los factores fueron dos y tres, para las variedades mejoradas y los híbridos, respectivamente.

2.2 Análisis de las variables de sitio.

La evaluación y cuantificación de la calidad de sitio comprendió el análisis multivariado de las variables físico-químicas que caracterizan el ambiente (suelo y clima), denominadas "variables de sitio". El objetivo de esta sección fue lograr una escala unidimensional en la cual se pudieran

ubicar los sitios según un orden creciente de calidad o capacidad para sostener una producción.

A continuación se detalla el procedimiento en orden cronológico. Todo el análisis descrito en esta sección se llevó a cabo en tres niveles de agregación de los datos: a) cada observación fue un sitio ($n=186$); b) cada observación correspondió al promedio de sitios en un área ($n=59$) y c) cada observación fue el promedio de los sitios de una zona ($n=18$).

2.2.1. Análisis de componentes principales. El análisis consistió en obtener vectores que son funciones lineales de las variables de sitio. Estos vectores son ejes ortogonales con la particularidad de que el primero explica la máxima porción de la varianza total que puede ser representada en una dimensión (1, 68). El segundo componente, a su vez, corresponde a la máxima varianza no explicada por el primer componente y así sucesivamente hasta tener tantos componentes como variables y se explica toda la varianza de los datos (1, 68).

Se tomaron en cuenta tantos componentes como fuera necesario para explicar el 75 % de la varianza entre los datos. Se obtuvo la ubicación de cada sitio en cada uno de estos componentes principales. Esta ubicación es la coordenada del sitio en el eje correspondiente al componente principal y surge de aplicar la función lineal representada por el vector

del mismo a los valores de las variables de sitio de cada observación.

2.2.2. Correlaciones. Se obtuvieron las correlaciones simples entre todas las variables (de sitio, de cultivo y componentes principales). Según el resultado, se definieron las variables de sitio a utilizar en la regresión para obtener "calidad". Se escogieron las variables de sitio que correlacionaran significativamente con la energía de rendimiento y se eliminaron las autocorrelacionadas.

2.2.3. Regresiones múltiples. Como se apuntó anteriormente, en algunos casos se utilizó la energía de rendimiento como un indicador de la calidad de sitio. En realidad, se utilizaron cuatro formas diferentes de expresar el rendimiento. Estas fueron: energía producida por el sistema durante el ciclo de cultivo; energía producida por mes; energía neta (salidas - entradas al sistema) producida en el ciclo de cultivo y energía neta por mes. De ahora en adelante se referirá a estas variables en conjunto como "variables de respuesta".

Se hicieron regresiones lineales múltiples entre cada una de las variables de respuesta y las variables de sitio escogidas según el procedimiento descrito arriba. En cada regresión, todos los parámetros debían ser significativos según la prueba de T ($p < 0,05$). En el caso de que alguno no lo fue-

ra, se corrió nuevamente la regresión, eliminando la variable en cuestión.

El mismo procedimiento de regresión lineal múltiple se utilizó para relacionar las variables de respuesta con los primeros componentes principales (variables independientes). Al ser éstos ortogonales, no fue necesario eliminar ninguno previamente por autocorrelación y sólo se eliminaron aquéllos cuyos parámetros en la regresión no fueran significativos (Prueba de T; $p < 0,05$).

De esta forma se llegó a 24 regresiones escogidas, 12 para cada grupo de variables independientes (variables originales y componentes principales). Las 12 regresiones surgieron de utilizar cuatro variables de respuesta y de trabajar en los tres niveles de agregación antes mencionados.

2.2.4. Definición de la calidad de sitio. El primer método usado para definir calidad de sitio consistió en asignar un puntaje a cada sitio según sus coordenadas en los primeros componentes principales. Matemáticamente, la calidad de un sitio cualquiera (i) es:

$$\text{Calidad}_i = \sum_j^5 E_j F_{i,j}$$

Donde: E_j es el valor propio del componente "j".

$F_{i,j}$ es la coordenada o ubicación del sitio "i" en el componente "j".

- * el signo depende del signo de la correlación entre el componente "j" y el rendimiento.
- s es tal que los "s" primeros componentes explican el 75% de la varianza.

Por definición de los componentes, $E_1 > E_2 > \dots > E_n$ (1,68). De esta manera, los E_j ponderan a la coordenada del sitio según la importancia del componente "j", o sea según la proporción de la varianza total que explica.

En el segundo método también se expresó la calidad de sitio en función de los primeros componentes principales pero se utilizó a las variables de respuesta como indicadoras. De esta forma, la calidad de un sitio "i" según la variable de respuesta "k" fue:

$$\text{Calidad}_{i,k} = \sum_j^s A_{j,k} P_{i,j}$$

Donde: $A_{j,k}$ es el parámetro de la regresión lineal múltiple de la variable de respuesta "k" para el componente principal "j".

j sólo asume los valores para los cuales $A_{j,k}$ fueron significativos (T; $p < 0,05$).

$P_{i,j}$ y s: igual que en la fórmula anterior.

El tercer método fue muy similar al anterior en procedimiento pero se expresó la calidad en función de las varia-

bles de sitio escogidas. La calidad de un sitio "i" según la variable de respuesta "k" fue:

$$\text{Calidad}_{i,k} = \sum_l B_{kl} V_{il}$$

Donde: B_{kl} es el parámetro correspondiente a la variable de sitio escogida "l" en la regresión lineal múltiple realizada con la variable de respuesta "k" como variable dependiente.

V_{il} es el valor observado en el sitio "i" para la variable de sitio "l".

Se definieron, por lo tanto, 27 escalas de calidad de sitio: con el primer método fueron tres, una para cada nivel de agregación; con el segundo y tercer método fueron 12 en cada uno, una para cada variable de respuesta y para cada nivel de agregación.

Se seleccionó la calidad de sitio que tuviera la máxima correlación lineal con las variables de respuesta. Se analizó también la relación entre las diferentes calidades para determinar si las tendencias eran o no similares en todas.

Por último, se relacionó la calidad de sitio escogida con las variables de sitio más comúnmente medidas en el área centroamericana para así ampliar los alcances de esta parte el trabajo.

2.3. Relaciones entre calidad de sitio, energía invertida y producción.

El análisis de la relación entre la calidad de sitio, la energía invertida y la producción en sistemas agrícolas se ordenó mediante el establecimiento de hipótesis de trabajo. Para probar estas hipótesis se usaron métodos estadísticos como regresión, pruebas de medias, etc. y se utilizó el archivo completo a nivel de parcela, o sea 365 observaciones. En todos los casos, la hipótesis nula fue "no existe relación" y las hipótesis alternativas se detallan a continuación.

i. Existe relación entre la energía invertida y la producida en los sistemas agrícolas. Para rechazar la hipótesis nula correspondiente, el modelo $y = f(x)$, donde y es la energía producida y x es la energía invertida, debe ser estadísticamente significativo ($p < 0,05$) según la prueba de F. Teóricamente, el tipo de relación es cuadrático o lineal hasta un cierto x . Como la energía entra al sistema por diferentes conceptos (fertilizantes, trabajo, pesticidas, etc.) se intentó probar el efecto de cada una de estas categorías de energía sobre y .

ii. Existe relación entre la calidad del sitio y la energía producida en un sistema. La función en este caso es

$y = f(z)$, siendo z la calidad. El criterio de rechazo fue igual al caso anterior.

iii. Existe relación entre la calidad de sitio y la energía que se decide invertir. El criterio de rechazo fue el mismo y la función es $x = f(z)$.

iv. Existe relación entre la calidad de sitio, la energía invertida y la producción. El criterio de rechazo fue la significancia del modelo $y = f(x,z)$. El análisis del tipo de relación, una vez rechazada la hipótesis nula, incluye funciones como las siguientes: la respuesta a la energía invertida es diferente según la calidad de sitio; para obtener un rendimiento dado, la energía que se requiere invertir es menor al aumentar la calidad de sitio; la curva exponencial negativa típica de eficiencia energética en función de la energía invertida (24,34) tiene diferente forma y/o parámetros para cada calidad; etc.

RESULTADOS Y DISCUSION

1. Características de los datos.

Las dificultades encontradas para recopilar información con las condiciones apuntadas en Materiales y Métodos obligan a describir algunos rasgos del archivo utilizado. Aunque se recolectaron todos los datos disponibles que tuvieran las propiedades requeridas, las características que se detallan a continuación no reflejan, necesariamente, las de todas las fincas centroamericanas con cultivos de subsistencia.

Hubo preponderancia de sitios con temperaturas relativamente bajas (≤ 24 C; altitud > 600 msnm) o, según la terminología de Holdridge (26), pertenecientes al piso altitudinal premontano. Por otra parte, en los sitios del piso altitudinal basal, hubo predominio de lugares con alta precipitación (Fig. 1). La consecuencia de esto fue que las altas temperaturas estuvieron ligadas a mayor precipitación y, por lo tanto, a un menor contenido de cationes divalentes en el suelo. Estas relaciones se analizan con más detalle en la siguiente sección, pero las tendencias generales pueden observarse aún en el máximo grado de agregación de los datos - a nivel de zona (Cuadro 3).

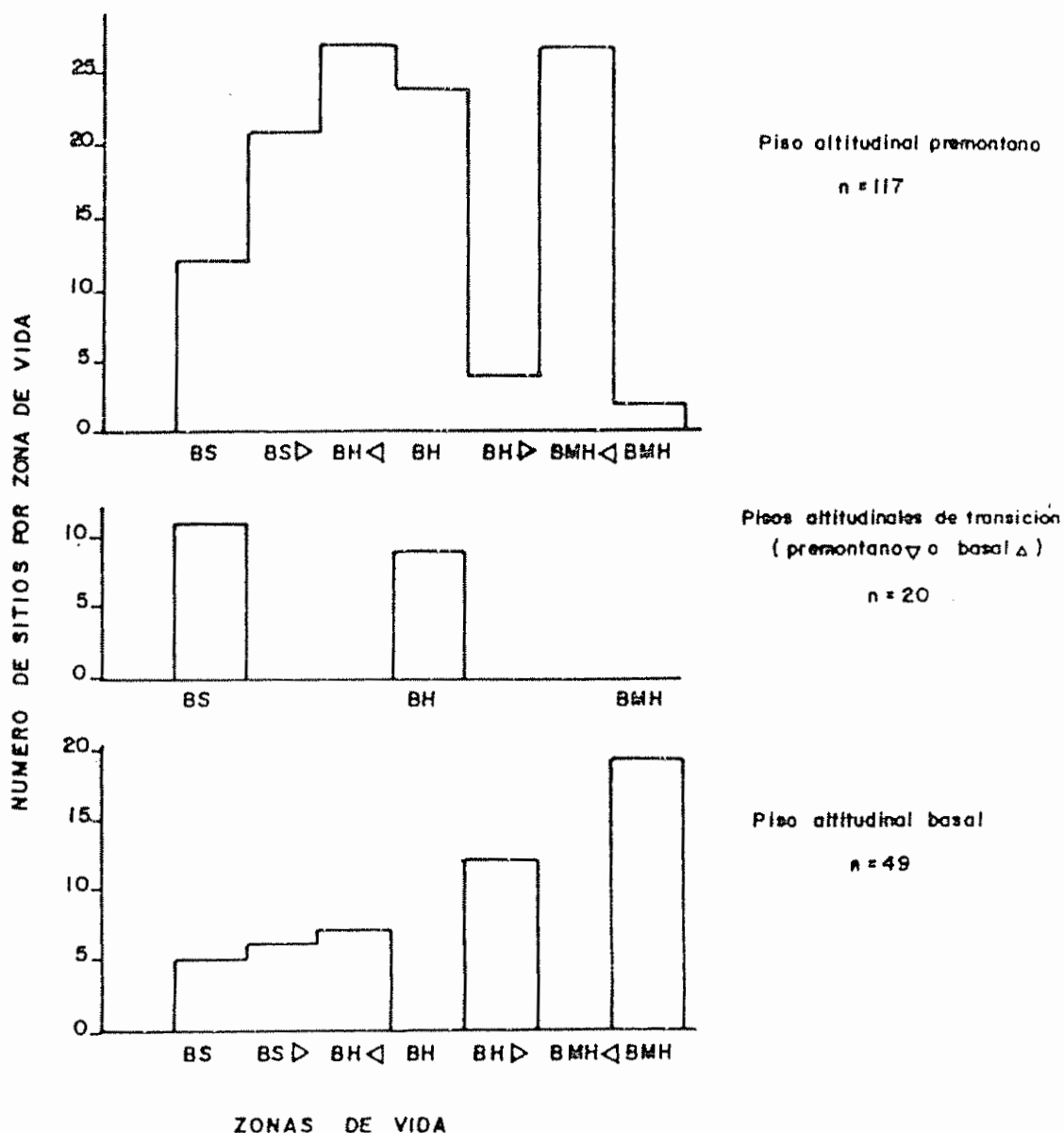


Figura 1. Distribución de frecuencia de las zonas de vida en cada piso altitudinal (BS: bosque seco, BS▷: bosque seco transición a húmedo, BH◁: bosque húmedo transición a seco, BH: bosque húmedo, BH▷: bosque húmedo transición a muy húmedo, BMH◁: bosque muy húmedo transición a húmedo, BMH: bosque muy húmedo).

CUADRO 3. Algunas Características de los Datos, Agrupados a Nivel de Zona (máximo grado de agregación), Ordenados Según la Temperatura

País	Zona	No. sitios	No. parcela	Zonas de Vida (Clas. Holdridge) (26)	Temp. \bar{x} Anual (C)	Precip. Anual (mm)	Altitud (msnm)	Pend. (%)	Análisis de Suelo			
									Ca (mg/100g)	Mg (mg/100g)	Partic. Arcilla pH	
Nicaragua	Sisle	6	6	BH-P (*)	19,4	1210	1147	40	17,0	5,5	25,3	5,9
Nicaragua	Los Robles	12	12	BH-P	20,6	1459	952	30	13,6	4,3	28,1	5,7
Nicaragua	Estelí	11	12	BS-P	21,0	975	840	5	17,8	8,1	21,5	6,3
Nicaragua	Pueblo Nuevo	12	13	BS-PD	21,0	1050	840	15	17,9	7,2	19,2	6,8
Costa Rica	Puriscal	6	6	BH-PD (BMH-P 4, BH-TA)	21,1	2145	1039	41	16,0	4,9	39,8	5,6
Costa Rica	Acosta	29	29	BMH-P (BMH-P, BH-TA)	21,1	2350	1048	38	20,3	7,0	37,5	5,6
Nicaragua	Condega	9	10	BS-PD	21,7	1000	750	15	19,6	7,3	23,2	6,6
Nicaragua	La Trinidad	17	17	BH-P 4	22,1	1250	700	10	21,6	9,0	22,1	6,6
Nicaragua	Suni	15	15	BH-P 4	22,7	1257	864	30	17,2	5,6	22,1	6,2
Guatemala	Jutiapa	12	36	BS-TA, BH-P 4	22,9	1176	887	9	9,0	5,2	37,7	6,1
Costa Rica	Guácimo	7	31	BH-TD	25,1	3124	90	5	9,7	2,7	25,6	6,0
El Salvador	Chalatenango	7	28	BH-PV	25,7	1618	381	4	12,7	4,4	61,6	5,6
Guatemala	Santa Rosa	6	21	BS-T (BH-P)	25,8	1316	580	12	11,9	3,9	27,3	6,2
Costa Rica	San Carlos	5	7	BH-TD	26,0	3220	122	5	6,3	2,2	26,0	5,2
Costa Rica	Cariari	19	70	BMH-T	26,0	4060	270	5	9,7	2,4	26,8	6,0
El Salvador	Morazan	4	16	BS-TD	26,4	1636	202	8	20,8	8,6	57,0	5,4
El Salvador	La Paz	2	8	BS-TD	26,8	1727	80	2	8,4	2,6	23,5	6,1
El Salvador	Ahuachapan	7	28	BH-T	26,9	1854	281	10	10,1	3,6	56,6	5,7

(*) Leyenda: B = Bosque; S = Seco; H = Húmedo; MH = Muy Húmedo; P = Premontano; T = Tropical Basal

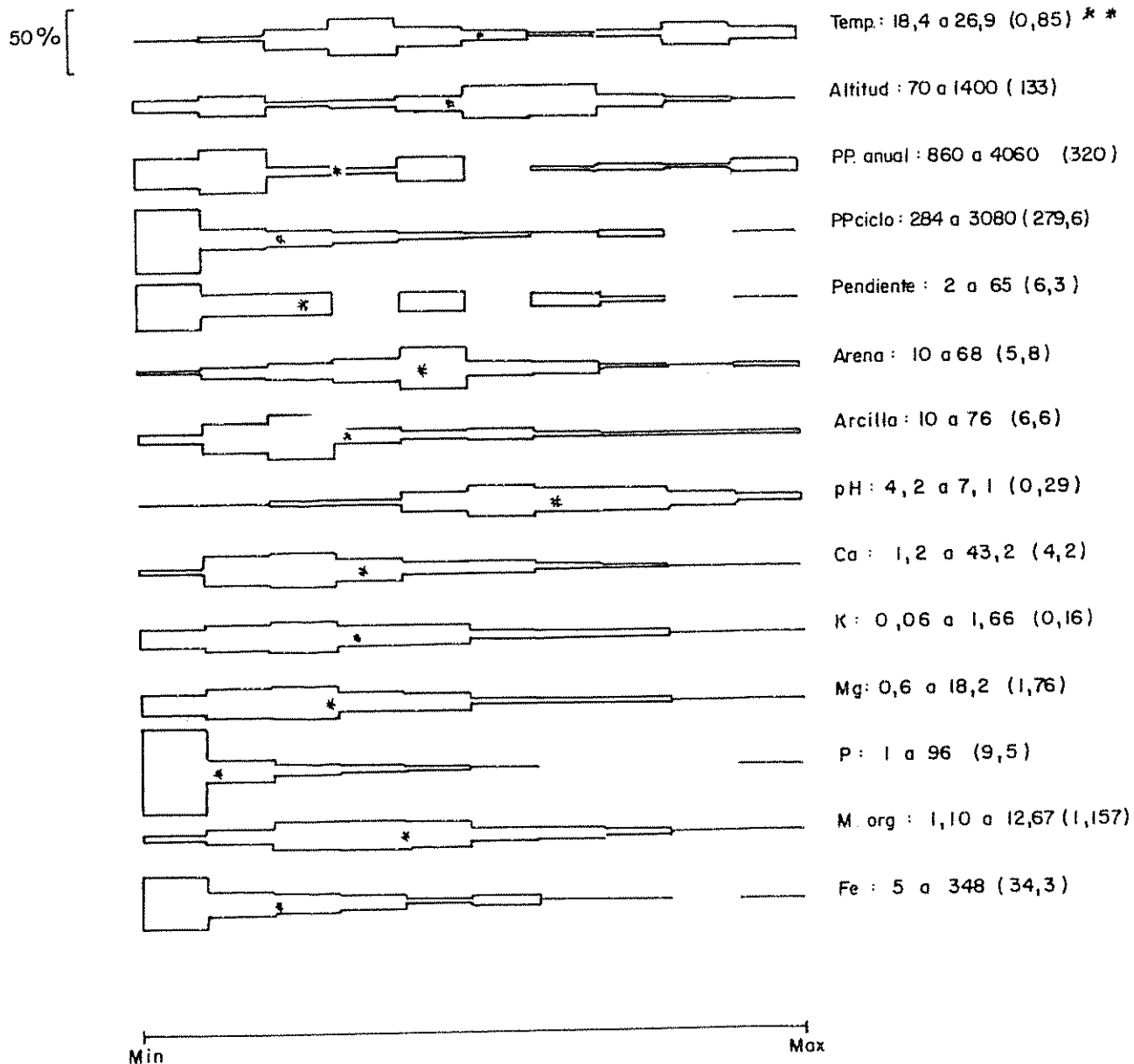
▷ Transición a la provincia de humedad siguiente en humedad.

◁ Transición a la provincia de humedad siguiente más seca.

∇ Transición al piso altitudinal superior; ∇ = transición al piso altitudinal inferior.

Aunque se consiguió un amplio rango en los valores de las variables de sitio, la distribución de frecuencias distó mucho de ser uniforme (Fig. 2). Esta uniformidad hubiera sido deseable para poder analizar la respuesta de los cultivos a todos los valores de las variables de sitio.

Incluso las variables que se utilizaron para caracterizar el suelo y el clima (Cuadro 4) fueron definidas por la información disponible. En diferentes estudios realizados para relacionar propiedades del medio con la respuesta de las plantas, las variables que probaron ser relevantes fueron: la profundidad del suelo (9,20,21,55, 58), la textura del suelo (9,31,55,58,64), la retención o disponibilidad de agua (4,20, 44,55), la salinidad (4,55,58, 66), el contenido de humus (21,31,64) o acumulación de materia orgánica (44), la disponibilidad de nutrientes (4,44,64,66), el drenaje (9,20,55, 58), el pH (32,55,64), la saturación de bases (59,64) o de aluminio (4,32), la C.I.C. (31), el régimen hídrico (4,66) y térmico (4,20), la densidad (31), la pendiente (55), etc. De todas estas variables, solo el pH y el contenido de algunos nutrientes se analizan rutinariamente en Centroamérica y muchas no se cuantifican salvo en casos excepcionales (CIC, disponibilidad de agua, régimen hídrico, etc.). Las únicas propiedades físicas del suelo que se miden con cierta regularidad son la textura y la pendiente, por lo cual sólo éstas se pudieron tomar en cuenta.



* Media general

** Nombre de la variable: valor mínimo a valor máximo (valor de cada intervalo)

Figura 2. Distribución de frecuencias de algunas variables de sitio.

CUADRO 4. Variables Incluidas en el Estudio

Variables de Sitio	Variables de Cultivo
<p>Climáticas:</p> <p>Precipitación anual \bar{x} (mm)</p> <p>Precip. durante ciclo cultivo (mm)</p> <p>Temperatura media anual (C)</p>	<p>Insumos (kg/ha):</p> <p>Semilla</p> <p>Fertilizantes</p> <p>Herbicidas</p>
<p>Suelo (análisis rutinarios [15]) y tierra</p> <p>pH</p> <p>P (ppm)</p> <p>Ca (meq/100 ml)</p> <p>Mg (meq/100 ml)</p> <p>K (meq/100 ml)</p> <p>Cu (ppm)</p> <p>Zn (ppm)</p> <p>Mn (ppm)</p> <p>Fe</p> <p>Materia orgánica (%)</p> <p>Arena (%)</p> <p>Arcilla (%)</p> <p>Pendiente (%)</p> <p>Altitud (msnm)</p>	<p>Insecticidas</p> <p>Fungicidas</p> <p>Trabajo:</p> <p>Mano de obra (horas/ha)</p> <p>Bueyes (horas/ha)</p> <p>Mecanización</p> <p>Producción:</p> <p>Rendimiento (kg/ha)</p> <p>Otras:</p> <p>Area (ha)</p> <p>Densidad (plantas/ha)</p> <p>Duración del ciclo (meses)</p>
<p>Clasificaciones:</p> <p>Ecológica: en Zonas de Vida (26)</p> <p>Suelos: Séptima aproximación</p>	

De lo anterior se desprende que hay otras variables relevantes para caracterizar el ambiente aparte de las consideradas. Pero la inclusión de cualquier otra propiedad en el análisis hubiera reducido drásticamente el número de datos.

2. Variables de sitio.

2.1. Análisis de componentes principales.

Para explicar por lo menos 75% de la varianza fueron necesarios seis, cinco y cuatro componentes en los tres niveles de agregación (Cuadros 5, 6 y 7). Este resultado coincidió con la afirmación de Webster (68), según la cual en casi todos los estudios de suelos, cuatro o cinco valores propios de un total de 20 a 40 han representado un 70% de la varianza de las variables.

Para interpretar cada componente principal, se buscó en cada vector propio los números mayores en valor absoluto. Las variables correspondientes a estos números son las que más contribuyeron al componente (29,69). El análisis de la correlación entre las variables originales y los componentes (Cuadro A1*) es un método alternativo, utilizado en los estudios de Kuma (29,20), mediante el cual se llegó a los mismos re-

* Cuadros cuyos números están precedidos por la letra "A" pertenecen al Apéndice.

CUADRO 5. Resultado Parcial del Análisis de Componentes Principales de las Variables de Suelo y Clima a Nivel de Sitio (n = 186)

	COMPONENTES PRINCIPALES					
	Primero	Segundo	Tercero	Cuarto	Quinto	Sexto
Valor propio	4,7763	4,0976	2,9016	1,8195	1,5304	1,2649
Proporción varianza	0,2274	0,1951	0,1382	0,0866	0,0729	0,0602
Proporción acumulada	0,2274	0,4226	0,5607	0,6474	0,7203	0,7805
Vectores Propios						
Altitud	0,3286	-0,0677	0,2885	-0,1919	-0,1656	-0,0468
PPan	-0,2840	0,1336	0,1142	0,3728	-0,0334	-0,0165
Temperatura	-0,3382	0,1127	-0,3127	0,1104	0,0208	0,0508
pH	0,1618	-0,2751	-0,2228	0,1736	0,1269	-0,1293
P	0,0445	-0,2338	-0,1437	0,0908	-0,0088	0,3561
Ca	0,3363	-0,0067	-0,1157	0,2589	-0,1520	0,2777
Mg	0,3679	0,0217	-0,1734	0,0167	0,0474	0,1362
K	0,0928	-0,3786	-0,0721	0,0333	-0,2348	0,2166
Cu	-0,0314	-0,0396	0,3733	-0,0914	0,3960	0,2362
Zn	-0,1367	-0,0664	0,0820	0,0404	0,1186	0,6254
Mn	-0,1538	0,1139	0,0021	-0,4438	0,0573	0,3664
Fe	-0,1069	-0,0046	0,4754	-0,0184	0,1754	0,0492
M Orgánica	-0,0863	0,0846	0,3456	0,3644	-0,0479	-0,1684
Pendiente	0,2336	0,0753	0,3566	0,0671	-0,2543	0,0491
Arena	-0,0159	-0,3254	-0,0830	0,0364	0,4540	-0,0897
Arcilla	-0,0593	0,3385	-0,0867	-0,2007	-0,4300	0,1177
PPCIC	-0,3584	0,1719	-0,1587	0,0112	-0,0033	0,0547
Ca/K	0,2119	0,3720	-0,0461	0,2196	0,1831	0,1085
Mg/k	0,2390	0,3550	-0,1003	-0,0028	0,2924	0,0135
(Ca Mg/K)	0,2265	0,3780	-0,0641	0,1582	0,2221	0,0827
Mg/Ca	0,0975	0,0609	-0,1112	-0,4607	0,2076	-0,2255

PPan es la precipitación anual promedio y PPCIC la precipitación durante el ciclo del cultivo

CUADRO 6. Resultado Parcial del Análisis de Componentes Principales de las Variables de Suelo y Clima a Nivel de Area (n = 59).

COMPONENTES PRINCIPALES					
	Primero	Segundo	Tercero	Cuarto	Quinto
Valor propio	5,9169	4,6264	2,9289	1,6471	1,4524
Proporción varianza	0,2818	0,2203	0,1395	0,0784	0,0692
Proporción acumulada	0,2818	0,5021	0,6415	0,7200	0,7891
Variables	Vectores Propios				
Altitud	0,2945	-0,0514	0,2717	-0,2186	-0,2796
PPan	-0,3034	-0,0323	0,1196	0,2978	0,1500
Temperatura	-0,3184	0,0886	-0,2699	0,2085	0,0819
pH	0,3080	-0,1096	-0,1756	0,0786	0,1475
P	0,1209	-0,1314	-0,2363	0,2433	-0,0474
Ca	0,3224	0,1125	0,0124	0,2128	0,0707
Mg	0,3297	0,1712	-0,0412	-0,0949	0,2113
K	0,1917	-0,3139	-0,1389	-0,0060	-0,0445
Cu	-0,0912	-0,1432	0,3056	-0,2975	0,4057
Zn	-0,1757	-0,1704	0,1313	0,0993	0,2121
Mn	-0,2834	0,0263	0,0064	-0,2639	0,0273
Fe	-0,1248	-0,1979	0,3983	-0,0986	0,2249
M Orgánica	-0,0080	-0,1069	0,4363	0,2540	0,0111
Pendiente	0,1222	-0,0208	0,4275	0,0940	-0,3618
Arena	0,1039	-0,2976	-0,1601	0,0656	0,3560
Arcilla	-0,2119	0,2939	-0,0150	-0,0718	-0,3761
PPCIC	-0,3545	0,0918	-0,1093	-0,0845	-0,0043
Ca/K	0,0674	0,4061	0,1346	0,2133	0,1686
Mg/K	0,1027	0,4109	0,0831	0,0073	0,2664
Ca + Mg/K	0,0799	0,4145	0,1203	0,1505	0,2029
Mg/Ca	0,0896	0,1688	-0,1070	-0,6037	0,1278

PPan y PPCIC son las precipitaciones anual media y del ciclo, respectivamente.

CUADRO 7. Resultado Parcial del Análisis de Componentes Principales de las Variables de Suelo y Clima a Nivel de Zona (n = 18)

COMPONENTES PRINCIPALES				
	Primero	Segundo	Tercero	Cuarto
Valor propio	5,4562	3,8365	2,3422	1,7351
Proporción varianza	0,3410	0,2398	0,1464	0,1084
Proporción acumulada	0,3410	0,5808	0,7272	0,8356
Vectores Propios				
Altitud	0,2596	0,2425	0,2539	0,1046
PPan	-0,3359	0,0626	-0,0199	-0,2971
Temperatura	-0,2473	-0,3275	-0,2627	-0,0404
pH	0,3210	0,1094	-0,3394	-0,0941
P	0,2657	-0,0315	-0,3412	-0,1184
Ca	0,3323	0,0571	0,3047	-0,1260
Mg	0,3555	-0,0182	0,2638	0,0752
K	0,2733	0,2677	-0,2513	0,1661
Cu	-0,1451	0,3765	0,1382	0,2585
Zn	-0,2904	0,2536	-0,0595	0,1431
Mn	-0,2654	-0,0991	0,0426	0,5141
Fe	-0,1871	0,4091	0,1764	0,1207
M Orgánica	-0,1420	0,3356	0,2084	-0,3683
Arcilla	-0,0956	-0,3829	0,2708	0,0257
(Ca + Mg)/K	0,0545	-0,2573	0,4814	-0,1929
Mg/Ca	0,1740	-0,1821	0,0692	0,5362

PPan es la temperatura media anual.

sultados. Se consideraron variables importantes para un componente aquéllas cuyo coeficiente de correlación con el mismo fue $\geq 0,60$.

El primer componente, coordenada que sigue la dirección de mayor variabilidad de la nube de puntos (1,43,68) fue muy similar en los tres niveles de agregación. Representó a las características del clima y al contenido de bases (Ca y Mg), muy correlacionadas con las anteriores. De esta forma, los sitios con alta temperatura, alta precipitación y bajo contenido de bases se ubicaron en un extremo mientras que los sitios de altura, con menor temperatura y precipitación y mayor contenido de bases se ubicaron en el otro.

El segundo componente principal representó, tanto a nivel de sitio como de área, a la textura y al potasio. Sitios arcillosos con mayores relaciones Ca/K, Mg/K y (Mg+Ca)/K se encontraron en un extremo y sitios arenosos de mayor pH y mayor contenido relativo de K se ubicaron en el otro. A nivel de zona, la interpretación del segundo componente no fue tan simple ya que intervino también el contenido de materia orgánica y los elementos que forman complejos con ésta (Fe, Cu) en forma opuesta al contenido de arcilla.

El tercer componente separó, a nivel de sitio y de área, los lugares según su contenido de materia orgánica y metales

asociados (Fe, Cu), característica unida a una mayor altitud y pendiente y a menores temperaturas.

La interpretación de los componentes principales, o sea asignarles un significado físico, es generalmente deseable. Sin embargo, los componentes son construcciones matemáticas y no tienen, necesariamente, un significado físico (68). Aunque la interpretación de los primeros uno o dos componentes es casi siempre posible, el significado de los componentes sucesivos tiende a dificultarse hasta hacerse imposible (68). En el presente estudio, este análisis fue un paso intermedio en la obtención de una escala unidimensional para caracterizar los sitios. Asignar un significado físico a los componentes no fue, entonces, indispensable.

2.2. Correlaciones.

En la matriz de correlaciones simples entre las variables de suelo y clima (Cuadros 8, A2 y A3 para los niveles de sitio, área y zona, respectivamente) se observaron algunas correlaciones naturales o lógicas y otras propias del archivo considerado. Entre las primeras se encuentran:

a) Correlación negativa ($p < 0,0001$) entre la altitud y la temperatura. Esto es un fenómeno natural que no requiere más explicación. La correlación positiva entre la pendiente y

Cuadro 8. Matriz de correlación entre las variables de suelo y clima a nivel de sitio (n = 186).

	All.	ppm	pH	P	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Zn	Mn	Fe	MO	Pend.	Arq.	Arq.	Pr. Lic	Ca/F	Mg/E	Ca/Mg	Mg/Ca
Temperatura	-0,91*	0,50*	-0,17	-0,04	-0,35*	-0,39*	-0,20	-0,28*	0,13	0,26.	-0,24	-0,08	-0,59*	0,02	0,78*	0,75*	0,08	-0,12	-0,09	-0,12	-0,09	-0,12
Altitud	-0,50*	0,06	0,01	0,32*	0,18	0,13	-0,16	-0,15	0,15	0,15	0,02	0,68*	-0,11	-0,10	-0,10	-0,72*	0,05	0,12	0,18	0,15	0,15	0,15
Prec. Anual	..	-0,30*	..	-0,21	-0,26*	-0,41*	-0,25*	0,10	0,19	-0,02	0,27.	0,48*	-0,10	-0,17	0,09	0,72*	-0,03	-0,15	-0,07	-0,31*	-0,07	-0,31*
pH	0,28*	0,29*	0,29*	0,46*	-0,18	-0,05	-0,39*	-0,36*	-0,19	-0,21	0,42*	-0,47*	-0,27.	-0,13	-0,08	0,12	-0,01	-0,01	-0,01
P	0,14	0,08	0,39*	-0,09	0,20	-0,14	-0,17	-0,20	-0,17	0,25.	-0,25.	-0,17	-0,18	-0,20	-0,19	-0,11	-0,11	-0,11
Ca	0,83*	-0,16	-0,13	-0,28*	-0,31*	-0,15	0,32*	-0,06	-0,05	-0,43*	0,40*	0,30*	0,30*	0,30*	0,30*	0,30*	0,30*
Mg	0,27.	-0,11	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21	-0,21
K	-0,05	0,09	-0,16	-0,15	-0,15	0,02	0,32*	-0,36*	-0,27.	-0,51*	-0,49*	-0,49*	-0,49*	-0,49*	-0,49*
Cu	0,20	0,15	0,12	-0,28*	-0,11	-0,06	-0,04	-0,06	-0,11	-0,06	-0,04	-0,06	-0,04	-0,06	-0,06
Zn	0,04	-0,08	0,05	-0,07	0,18	-0,14	-0,18	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15
Mn	0,08	-0,17	-0,10	-0,08	0,33*	0,15	0,06	-0,01	-0,05	0,14	-0,05	0,14	-0,05	0,14	-0,05
Fe	0,43*	0,23	-0,02	-0,15	0,03	-0,14	-0,18	-0,15	-0,12	-0,18	-0,15	-0,12	-0,18	-0,15
Mat. org.	0,26.	-0,05	0,19	0,06	-0,07	0,04	-0,31*	0,04	-0,31*	0,04	-0,31*	0,04	-0,31*
Pendiente	-0,28*	0,06	-0,49*	0,25.	0,17	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Areno
Arcilla
Precip. Liric
Ca/K
Mg/K
{Ca/Mg}/K

* Coeficiente de correlación significativamente diferente de 0 (p < 0,0001);
 Coeficiente de correlación significativamente diferente de 0 (p < 0,001)

la altitud (y negativa con la temperatura) también es un hecho generalizado en la zona.

b) Las correlaciones positivas y significativas entre los cationes intercambiables (K, Ca, Mg) y de éstos con el pH son fenómenos bien conocidos (17,60), al igual que la correlación negativa del pH con el Mn y Fe (8) y positiva con el P (17,60). Las relaciones Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K correlacionaron en forma positiva ($p < 0,0001$) entre sí y con los contenidos de Ca y Mg y en forma negativa con el K.

c) Los contenidos de arena y arcilla correlacionaron en forma negativa, como es lógico. La correlación entre la arcilla y el Mn ya ha sido reportada para Centroamérica (8).

d) La correlación negativa entre la precipitación anual y el pH, Mg, K y Ca se explica por el lavado de cationes intercambiables en suelos que reciben alta precipitación (17,60).

Entre las correlaciones propias de este archivo de datos, la principal es la relación positiva entre la temperatura y la precipitación ($p < 0,0001$). En la Fig. 1 se mostró la preponderancia de sitios húmedos en el piso altitudinal basal. Esta relación parece ser la causa principal de la correlación negativa de la temperatura con los cationes Ca, Mg, K y con el pH.

2.3. Calidad de sitio.

Los coeficientes de correlación entre las variables de respuesta de cultivo y las variables de sitio (Cuadro 9) permitieron determinar cuáles de éstas tuvieron mayor efecto sobre aquéllas en cada nivel de agregación de los datos. El objetivo del análisis de estas correlaciones fue seleccionar las variables de sitio a utilizar en las regresiones múltiples para generar escalas de calidad de sitio. La respuesta del rendimiento a cada variable individual no puede deducirse a partir de su correlación ya que todas las demás variables no se mantuvieron constantes. Por ejemplo, a partir de la correlación negativa observada entre las variables de respuesta y los cationes Ca y Mg, no se puede concluir que éstos tienen un efecto negativo sobre el rendimiento. Es un hecho bien conocido que, en un sitio dado, la adición de Ca o Mg puede incrementar el rendimiento (17,60) y no se encontró ningún caso en que lo disminuyera. El mayor rendimiento observado en sitios con menor contenido de cationes en el suelo se debió a que estos sitios tuvieron también mayor temperatura, mayor precipitación durante el ciclo de cultivo, etc. Según Sanchez (60), las correlaciones del análisis de suelo no pueden predecir rendimientos ya que éstos y el crecimiento de cultivos son función de muchas variables más allá del simple nutrimento en consideración.

CUADRO 9. Correlaciones entre las Variables de Sitio y las de Respuesta

Variables de Sitio	NIVEL DE AGRICULTACION ANA (n = 59)												
	SITIO (n = 186)						VARIABLES DE RESPUESTA (Kcal/h)						
	Prod/ciclo	Prod. neta/ ciclo	Prod/mes	Prod. neta/ Prod/mes	Prod/ciclo	Prod. neta/ ciclo	Prod/mes	Prod. neta/ Prod/mes	Prod/ciclo	Prod. neta/ ciclo	Prod/mes	Prod. neta/ Prod/mes	
Temperatura	0,55**	0,56**	0,28**	0,36**	0,61**	0,31	0,37	0,69	0,69	0,33	0,41	0,33	0,41
Altitud	-0,41**	-0,43**	-0,14	-0,23	-0,45*	-0,46*	0,19	-0,53	-0,54	-0,15	-0,25	-0,15	-0,25
Prec. Anual	-0,04	0,04	-0,03	0,04	0,20	0,26	0,20	0,12	0,20	0,09	0,18	0,09	0,18
pH	-0,14	-0,16	-0,14	-0,14	-0,44*	-0,45*	-0,30	-0,30	-0,32	-0,27	-0,27	-0,27	-0,27
P	-0,04	-0,05	-0,10	-0,10	-0,09	-0,10	-0,14	-0,13	-0,16	-0,21	-0,23	-0,21	-0,23
Ca	-0,35**	-0,36**	-0,21	-0,26*	-0,55**	-0,56**	-0,37	-0,75*	-0,75*	-0,55	-0,63	-0,55	-0,63
Mg	-0,34**	-0,37**	-0,29**	-0,33**	-0,56**	-0,59**	-0,46*	-0,65	-0,70	-0,62	-0,69	-0,62	-0,69
K	-0,16	-0,16	-0,07	-0,08	-0,33	-0,33	-0,19	-0,33	-0,33	-0,23	-0,26	-0,23	-0,26
Cu	-0,32**	-0,31**	-0,18	-0,20	-0,22	-0,18	-0,18	-0,25	-0,21	-0,18	-0,17	-0,18	-0,17
Zn	0,09	0,11	0,07	0,10	0,08	0,12	0,09	0,24	0,28	0,21	0,26	0,21	0,26
Mn	0,45**	0,42**	0,29**	0,28**	0,50**	0,47*	0,25	0,62	0,59	0,36	0,37	0,36	0,37
Fe	-0,25*	-0,22	-0,04	-0,05	-0,19	-0,13	0,02	-0,23	-0,18	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Mat. Orgánica	-0,22	-0,17	-0,06	-0,04	-0,26	-0,21	0,02	-0,30	-0,23	0,08	0,10	0,08	0,10
Pendiente	-0,35**	-0,35**	0,02	-0,07	-0,22	-0,21	0,16	-	-	-	-	-	-
Arena	-0,14	-0,15	-0,14	-0,14	-0,32	-0,32	-0,22	-	-	-	-	-	-
Arcilla	0,37**	0,36**	0,20	0,20	0,55**	0,54**	0,30	0,42	0,39	0,21	0,26	0,21	0,26
Precip. ciclo	0,39**	0,44**	0,15	0,25*	0,63**	0,66**	0,33	-	-	-	-	-	-
Ca/K	-0,12	-0,13	-0,07	-0,09	-0,10	-0,12	-0,08	-	-	-	-	-	-
Mg/K	-0,12	-0,14	-0,11	-0,14	-0,15	-0,18	-0,19	-	-	-	-	-	-
(Ca + Mg)/K	-0,13	-0,14	-0,08	-0,11	-0,12	-0,14	-0,11	-0,32	-0,36	-0,26	-0,32	-0,26	-0,32
Mg/Ca	0,03	-0,00	-0,09	-0,11	-0,01	-0,05	-0,22	0,10	0,05	-0,18	-0,21	-0,18	-0,21

** p < 0,0001 * p < 0,001 para la prueba de hipótesis Ho: r = 0

A nivel de sitio, la energía producida durante el ciclo de cultivo se relacionó significativamente con las siguientes variables (en orden descendente): temperatura, manganeso, altitud, precipitación durante el ciclo, arcilla, calcio, pendiente, magnesio y hierro (Cuadro 9). Todas estas variables podrían utilizarse en la regresión para obtener la calidad de sitio. Sin embargo, la temperatura correlacionó con la altitud, la precipitación durante el ciclo, la arcilla, el Ca, la pendiente y el Mg en forma significativa con $p < 0,0001$ y con el Mn con $p < 0,001$ (ver Cuadro 8). Por lo tanto, al eliminar las autocorrelacionadas, las variables de sitio elegidas en este caso fueron: temperatura, Fe y Mn. O sea que la función para obtener calidad de sitio quedó reducida a:

Energía de rendimiento por ciclo = $f(\text{temperatura, Fe, Mn})$.

Se siguió exactamente el mismo razonamiento al elegir las variables de sitio para las demás variables de respuesta. El resultado fue el siguiente:

Energía neta por ciclo = $f(\text{temperatura, Mn})$;

Energía de rendimiento por mes = $f(\text{Mg, Mn})$;

Energía neta por mes = $f(\text{temperatura})$.

A nivel de área, las variables escogidas fueron: precipitación durante el ciclo y Mn para las energías de rendimiento

y neta por ciclo y Mg para las energías de rendimiento y neta por mes. A nivel de zona, las variables escogidas fueron: Ca y Mn para la energía producida por ciclo (bruta y neta) y Mg para la energía producida por mes (bruta y neta).

La razón para excluir las variables autocorrelacionadas fue porque, dado el alto grado de colinealidad entre las variables de sitio, la inclusión de todas en un modelo de regresión da como resultado un alto cuadrado medio del error (39,40) y, consiguientemente, parámetros no significativos.

Un método alternativo para enfocar el problema de colinealidad entre las variables independientes es la regresión con componentes principales (19,39,40), o sea utilizando las coordenadas en los componentes principales como variables independientes en la regresión múltiple. Se ha demostrado la superioridad de este procedimiento frente a la regresión múltiple corriente al mitigar problemas serios de multicolinealidad (40).

Dado que los componentes son ortogonales (1), no existe inconveniente para incluirlos en el modelo de regresión. Se utilizó el análisis de correlación entre las variables de respuesta y los componentes (Cuadro 10) sólo para explorar cuáles de éstos tenían mayor probabilidad de aportar significativamente al modelo de regresión.

Cuadro 10. Correlaciones entre los componentes principales y las variables de cultivo.

Componente Principal	Energía producida por el sistema			
	bruta	neta	bruta/mes	neta/mes
NIVEL DE SITIO (n = 186)				
1	-0,46**	-0,50**	-0,25*	-0,33**
2	0,17	0,17	0,10	0,10
3	-0,39**	-0,36**	-0,07	-0,11
4	-0,29**	-0,24**	-0,15	-0,11
5	-0,16	-0,17	-0,19*	-0,18
6	-0,07	0,07	0,05	0,05
NIVEL DE AREA (n = 59)				
1	-0,52**	-0,55**	-0,33	-0,39*
2	0,33	0,30	0,13	0,14
3	-0,33*	-0,29	0,02	-0,01
4	-0,11	-0,07	0,08	0,11
5	-0,35*	-0,34*	-0,41*	-0,38*
NIVEL DE ZONA (n = 18)				
1	-0,41	-0,46	-0,40	-0,46
2	-0,51	-0,47	-0,25	-0,25
3	-0,51	-0,52	-0,26	-0,34
4	0,28	0,24	0,01	-0,01

** P < 0,0001

* P < 0,01

para la prueba de hipótesis $H_0: r = 0$

En el Cuadro 11 se resumió el resultado de las regresiones de las variables de respuesta en función de todas o algunas de las variables de sitio escogidas. En cada caso, para cada nivel de agregación y cada variable de respuesta, se seleccionó aquel modelo que explicara la mayor cantidad de varianza y que tuviera todos sus parámetros significativos según la prueba de T. Este modelo elegido generó la escala de calidad de sitio. Por ejemplo, a nivel de sitio y utilizando la energía de rendimiento por ciclo de cultivo como variable dependiente, el modelo elegido fue el que incluyó temperatura, Fe y Mn (Cuadro 11). La escala de calidad generada en este caso fue:

$$\text{Calidad} = A_0 + 905,92 \text{ temp} - 13,07 \text{ Fe} + 81,57 \text{ Mn} .$$

De esta forma se generaron las doce escalas de calidad en función de las variables de sitio utilizando diferentes formas de expresar el rendimiento como indicadores.

El uso de medidas biológicas de crecimiento como calidad de sitio y la búsqueda de relaciones con características y propiedades del medio tiene precedentes en investigaciones forestales (9,44) y agrícolas (4,21,31,45). En estas últimas el problema se complica debido a los diferentes niveles de manejo. El criterio seguido en este estudio de diagnosticar la calidad según el rendimiento, independientemente del manejo, ha sido sugerido para establecer la capacidad productiva

Cuadro 11. Regresiones entre las variables de respuesta y las variables de sitio escogidas según la matriz de correlación. Los modelos escogidos definieron diferentes ejes de calidad de sitio.

Variables independientes	n ^(a)	F modelo	R ² (%)	Parámetros Regresión			Modelos escogidos
				A ₁	A ₂	A ₃	
VARIABLE DEPENDIENTE: ENERGIA RENDIMIENTO/CICLO CULTIVO							
Temp.	186	79,52***	30,18	1206,89***			--
Temp., Fe	186	42,51***	31,72	1140,65***	-9,15		--
Temp., Fe, Mn	186	46,34***	43,31	905,92***	-13,07**	85,57***	Sf
Precip. ciclo	59	37,33***	39,57	5,62***			Sf
Prec. ciclo, Mn	59	22,82***	44,91	4,58***	54,40		--
Ca	18	20,18**	55,77	-720,46**			Sf
Ca, Mn	18	12,38**	62,28	-564,53*	60,94		--
VARIABLE DEPENDIENTE: ENERGIA NETA/CICLO CULTIVO							
Temp.	186	86,26***	31,92	1166,12***			--
Temp., Mn	186	60,97***	39,99	1006,31***	63,18***		Sf
Precip. ciclo	59	43,05***	43,03	5,55***			Sf
Prec. ciclo, Mn	59	24,70***	46,87	4,72***	43,76		--
Ca	18	25,04***	61,01	-698,41***			Sf
Ca, Mn	18	14,04**	65,18	-582,68*	45,23		--
VARIABLE DEPENDIENTE: ENERGIA RENDIMIENTO/MES							
Mg	186	16,80***	8,37	-73,89***			--
Mg, Mn	186	14,43***	13,62	-61,01**	8,95**		Sf
Mg	59	15,71**	21,61	-143,98**			Sf
Mg	18	10,07*	38,62	-185,12*			Sf
VARIABLE DEPENDIENTE: ENERGIA NETA/MES							
Temp.	186	26,79***	12,71	124,66***			Sf
Mg	59	20,80***	26,74	-151,14***			Sf
Mg	18	14,92	48,25	-194,66*			Sf

(a) n = número de observaciones. Indica el nivel de agregación de datos: n = 186, a nivel de sitio; n = 59, a nivel de área, n = 18 a nivel de zona.

*** P < 0,0001; ** P < 0,001; * P < 0,01 según prueba de F para la "F modelo" y según prueba de T para los parámetros de la regresión.

de un suelo (57) o como primer paso del análisis de las relaciones entre la calidad de tierra, los insumos y los rendimientos (4); incluso ha sido utilizado sin hacer mención al problema (21,31,45).

El uso de componentes principales para caracterizar los sitios y relacionarlos con el rendimiento tiene algunos precedentes (31,44,64). En el Cuadro 12 se resumió el resultado de las regresiones obtenidas entre cada una de las variables de respuesta y uno o varios componentes principales en los diferentes niveles de agregación. El modelo, en cada caso, se seleccionó según los mismos criterios descritos para las variables originales: máxima representación de la información con todos los parámetros significativos. Las 12 escalas de calidad dependientes del rendimiento en función de componentes principales se generaron a partir de los 12 modelos escogidos (uno para cada variable dependiente y para cada nivel de agregación) de igual forma que en el caso anterior. Por ejemplo, a nivel de sitio y con la energía de rendimiento por ciclo como indicadora, la calidad generada fue:

$$\text{Calidad} = A_0 - 1046 \text{ CP}_1 + 407 \text{ CP}_2 - 1147 \text{ CP}_3 - 1061 \text{ CP}_4 - 646 \text{ CP}_5.$$

Siendo CP_i la ubicación de cada sitio en el componente principal "i".

CUADRO 17 Regresiones entre las Variables de Respuesta y los Componentes Principales que Caracterizan el Sitio. Los modelos escogidos definieron los diferentes ejes de calidad de sitio.

Componentes Principales (xi)	N ^(a)	F Modelo	R ² (%)	PARAMETROS DE REGRESION						Modelos escogidos
				A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	
VARIABLE DEPENDIENTE: Energía Rendimiento/Ciclo Cultivo										
1, 2, 3, 4, 5, 6	186	30,26***	50,35	-1046***	407*	-1147***	-1061***	-646*	31	-
1, 2, 3, 4, 5	186	35,79***	49,85	-1046***	407*	-1147***	-1061***	-646*	-	Sf
1, 2, 4	186	48,75***	44,55	-1046***	-	-1147***	-1061***	-	-	-
1, 2, 3, 4, 5	59	18,73***	63,86	-1250***	366	- 850**	- 33*	-1416***	-	-
1, 3, 4	59	28,02***	60,41	-1250***	-	850**	-	-1416***	-	Sf
1, 3, 5	59	16,69***	39,16	-1250***	-	-	-	-	-	-
1, 2, 3, 4	18	9,13**	73,74	-1028*	-1072*	-1278*	1091*	-	-	Sf
1, 2, 3, 5	18	8,43*	64,28	-1028*	-1072*	-1278*	-	-	-	-
1, 2, 3, 4, 5	18	7,76	26,4*	-1028*	-	-	-	-	-	-
VARIABLE DEPENDIENTE: Energía Neta/Ciclo Cultivo										
1, 2, 3, 4, 5, 6	186	29,18***	49,45	-1064***	394*	- 992***	- 821***	- 645*	269	-
1, 2, 3, 4, 5	186	34,54***	48,97	-1064***	394*	- 992***	- 821***	- 645*	-	Sf
1, 2, 4	186	55,13***	37,60	-1064***	-	- 992***	-	-	-	-
1, 2, 3, 4, 5	59	17,87***	62,77	-1235***	278	- 692*	- 204	-1301**	-	-
1, 3, 4	59	28,40***	60,77	-1245***	-	- 692*	-	-1301**	-	Sf
1, 3, 5	59	42,25***	42,57	-1245***	-	-	-	-	-	-
1, 2, 3, 4	18	8,69**	72,78	-1037*	- 876	-1217	878	-	-	Sf
1, 2, 3, 5	18	7,32	31,38	-1037*	-	-	-	-	-	-
VARIABLE DEPENDIENTE: Energía Rendimiento/mes										
1, 2, 3, 4, 5, 6	186	4,85***	13,98	- 94**	43	- 33	- 94*	- 130*	38	-
1, 4, 5	186	8,40***	12,16	- 94**	-	-	- 94*	- 130*	-	Sf
1	186	12,00***	6,12	- 94**	-	-	-	-	-	-
1, 3, 5, 4, 5	59	4,42*	29,42	- 120*	7	21	63	- 287**	-	-
1, 5	59	11,05***	28,29	- 120*	-	-	-	- 287**	-	Sf
1, 2, 3, 4	18	1,01	23,64	- 117.	- 47	- 86	29	-	-	-
1	18	3,36	17,33	- 117.	-	-	-	-	-	Sf
VARIABLE DEPENDIENTE: Energía Neta/Mes										
1, 2, 3, 4, 5, 6	186	6,59***	18,10	- 121***	41	- 50	- 66	- 115*	34	-
1, 5	186	15,37***	14,38	- 121***	-	-	-	- 115*	-	Sf
1	186	23,13***	11,16	- 121***	-	-	-	-	-	-
1, 2, 3, 4, 5	59	5,08**	32,40	- 135**	2	9	73	- 251*	-	-
1, 5	59	12,57***	30,99	- 135**	-	-	-	- 251*	-	Sf
1, 2, 3, 4	18	1,64	33,49	- 129.	- 46	- 110	15	-	-	-
1	18	5,03	23,94	- 129.	-	-	-	-	-	Sf

(a) N = número de observaciones. Indica el nivel de agregación de los datos: n = 186, nivel de sitio; n = 59, nivel de área; n = 18, nivel de zona.

*** P<0,001 ** P<0,001 *P<0,01 .P<0,1 (si no hay * en modelo), según prueba de F para la F modelo y según prueba de T para los parámetros de la regresión

Las escalas así generadas, por lo tanto, también fueron obtenidas utilizando el rendimiento como indicador de calidad, independientemente del nivel de manejo.

Se obtuvieron también tres escalas de calidad, una para cada nivel de agregación, asignando a cada sitio un puntaje según su ubicación en los componentes principales, ponderada por el valor propio de cada componente. Estas escalas fueron:

$$\begin{aligned} \text{Calidad sitio} = & - 4,78 \text{ CP}_{s1} + 4,10 \text{ CP}_{s2} - 2,90 \text{ CP}_{s3} - \\ & - 1,82 \text{ CP}_{s4} - 1,53 \text{ CP}_{s5} + 1,26 \text{ CP}_{s6} . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calidad área} = & - 5,92 \text{ CP}_{a1} + 4,63 \text{ CP}_{a2} - 2,93 \text{ CP}_{a3} - \\ & - 1,65 \text{ CP}_{a4} - 1,45 \text{ CP}_{a5} . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calidad zona} = & - 5,46 \text{ CP}_{z1} - 3,84 \text{ CP}_{z2} - 2,34 \text{ CP}_{z3} \\ & + 1,74 \text{ CP}_{z4} \end{aligned}$$

Siendo:

CP_{s1} la ubicación de cada sitio en el componente principal 1 obtenido a nivel de sitio.

CP_{a1} la ubicación de cada área en el componente principal 1 obtenido a nivel de área.

CP_{z1} la ubicación de cada zona en el componente principal 1 obtenido a nivel de zona.

El signo positivo o negativo dependió del signo de la correlación entre cada componente y las variables de respuesta (Cuadro 10). Cambiar el signo de un componente no modifica nada porque son ortogonales. Esto se hizo para que las escalas fueran convenientemente crecientes.

En la literatura no se encontró mención a un método similar a éste. Lo más cercano fue la utilización de puntajes en el primer componente principal para cuantificar el potencial químico del suelo (28).

Las 27 escalas de calidad de sitio obtenidas correlacionaron entre sí en forma altamente significativa ($p < 0,0001$). El uso de cualquiera de ellas es, por lo tanto, indistinto. En el Cuadro 13 se resumió la descripción de las escalas de calidad y los coeficientes de correlación con las variables de respuesta. Se escogió la escala que correlacionó mejor con éstas en cada parcela ($n = 365$). Esta fue la escala obtenida a partir de los componentes principales a nivel de zona utilizando la energía de rendimiento por ciclo como indicadora de calidad. El modelo fue:

$$Cd = A_0 - 1028 CP_{x1} - 1072 CP_{x2} - 1278 CP_{x3} + 1091 CP_{x4}.$$

Esta función asigna un valor de calidad para cada una de las 18 zonas del estudio.

Cuadro 13. Resumen de descripción de las 27 escalas de calidad de sitio y correlación de éstas con al respuesta de los sistemas de cultivo.

Calidad definida en función de:	Indicador calidad (var. respuesta)	Origen de parámetros	Nivel de Agregación	COEFICIENTE CORRELACION CON:	
				En. Bruta/ciclo	En. Meta/mes
CPa 1,2,3,4,5,6	--	VP	Sitio	0,569*	0,321*
CPa 1,2,3,4,5	--	VP	Area	0,515*	0,282*
CPz 1,2,3,4	--	VP	Zona	0,577*	0,365*
CPe 1,2,3,4,5	En. Bruta/ciclo	RCP	Sitio	0,647*	0,347*
CPa 1,3,5	En. Bruta/ciclo	RCP	Area	0,622*	0,373*
CPz 1,2,3,4	En. Bruta/ciclo	RCP	Zona	0,634*	0,388*
CPa 1,2,3,4,5	En. Meta/ciclo	RCP	Sitio	0,662*	0,397*
CPa 1,3,5	En. Meta/ciclo	RCP	Area	0,627*	0,352*
CPz 1,2,3,4	En. Meta/ciclo	RCP	Zona	0,623*	0,383*
CPa 1,4,5	En. Bruta/mes	RCP	Sitio	0,655*	0,398*
CPa 1,5	En. Bruta/mes	RCP	Area	0,531*	0,341*
CPz 1	En. Bruta/mes	RCP	Zona	0,508*	0,379*
CPa 1,5	En. Meta/mes	RCP	Sitio	0,302*	0,210*
CPz 1	En. Meta/mes	RCP	Area	0,442*	0,276*
CPa 1,5	En. Meta/mes	RCP	Zona	0,517*	0,377*
Temp., Mn, Fe	En. Bruta/ciclo	RCP	Area	0,246*	0,210*
Precip. ciclo	En. Bruta/ciclo	RV	Sitio	0,616*	0,586*
Ca	En. Bruta/ciclo	RV	Area	0,267*	0,125
Temp., Mn	En. Bruta/ciclo	RV	Zona	0,501*	0,367*
Precip. Ciclo	En. Meta/ciclo	RV	Sitio	0,580*	0,337*
Ca	En. Meta/ciclo	RV	Area	0,267*	0,125
Mg, Mn	En. Bruta/mes	RV	Zona	0,501*	0,367*
Mg	En. Bruta/mes	RV	Sitio	0,532*	0,374*
Mg	En. Bruta/mes	RV	Area	0,327*	0,287*
Temp.	En. Bruta/mes	RV	Zona	0,372*	0,348*
Mg	En. Meta/mes	RV	Sitio	0,445*	0,255*
Mg	En. Meta/mes	RV	Area	0,327*	0,287*
Mg	En. Meta/mes	RV	Zona	0,372*	0,348*

CP = Componentes principales; subíndices: s = obtenidos a nivel de sitio; a = a nivel de área; z = a nivel de zona

VP = Valores propios de los componentes principales

RCP = Parámetros de la regresión lineal en función de componentes principales (Cuadro 12)

RV = Parámetros de la regresión lineal en función de variables de sitio (Cuadro 11)

* = Significativo con $P > 0,0001$. N = 365.

Se observa en el Cuadro 13 que las escalas de calidad obtenidas en forma independiente del rendimiento (sin usar éste como indicador de calidad) también correlacionaron en forma significativa con todas las variables de respuesta. Debido a esto y al interés de contar con una medida de calidad que no presentara los problemas teóricos derivados del uso de un indicador de calidad parcialmente dependiente de sistema de cultivo y del manejo, se utilizó también en los análisis subsiguientes a la escala de calidad independiente del rendimiento obtenida a nivel de sitio (Ci). La fórmula matemática correspondiente ya fue apuntada como "calidad sitio".

Mediante la obtención y selección de estas escalas de calidad de sitio se cumplió con el objetivo de caracterizar a las propiedades del suelo y del clima en una sola dimensión, de forma tal que explicara la variación de rendimiento entre sitios. El método utilizado fue cuantitativo, reproducible y objetivo, características indispensables según Kyuma y colaboradores (31).

Sin embargo, hay muchas otras variables que pueden tomarse en cuenta para definir la calidad de un sitio. Según Laker (33), los factores que afectan el potencial de producción de un área en un momento dado, pueden agruparse en: características fisicobiológicas (suelo, clima, topografía, hidrología, vegetación e incidencia de enfermedades) y situa-

ción socioeconómica (capacidad de manejo, disponibilidad de capital, distancia a mercados, sistema de tenencia, situación política, etc.). Por falta de variables fácilmente cuantificables, se ignoró totalmente lo referente a la situación socioeconómica. No obstante, muchas características pueden tomarse como constantes ya que se consideraron sólo pequeños agricultores y sistemas de producción de subsistencia.

En cuanto a las características fisicobiológicas, ya se discutió la ausencia de variables tales como la capacidad de retención de agua del suelo, su profundidad, etc. debido a que no fueron medidas en todos los estudios que dieron origen a este archivo. Al menos para los trabajos realizados en CATIE, deberían existir pautas sobre cuáles variables son necesarias para caracterizar una región y así contar siempre con una base de datos uniforme y adecuada.

Además, la calidad obtenida es válida para un momento dado. La facilidad con que un sitio se degrada debería incluirse al evaluar su calidad, o alternativamente, la energía necesaria para mantener el rendimiento y conservar el recurso (22). Al desarrollarse nuevas tecnologías incluso pueden variar las características que hacen a la calidad (22).

3. Relaciones entre calidad de sitio, energía invertida y producción.

3.1. Relación entre energía invertida y producción.

Según la primera hipótesis planteada en este sentido, se probó la significancia del modelo:

$y = f(x, x^2)$; siendo:

y : energía cosechable producida por el sistema (Mcal/ha)

x : energía invertida en el sistema (Mcal/ha); ésta incluyó todos los conceptos de energía (fertilizantes, trabajo, pesticidas, semillas y mecanización) que el agricultor invirtió en el sistema, denominada por algunos autores "energía cultural" (25,34) y por otros "energía comercial" (27). El modelo resultante fue:

$$y = 5548,17 + 1,09 x + 0,0005 x^2$$

Fue altamente significativo (prueba de F; $p < 0,0001$) pero no así sus parámetros (prueba de T); el R^2 fue de 22%.

De esta forma quedó rechazada la hipótesis de que no existió relación entre la energía que entró a los sistemas agrícolas y la energía que éstos produjeron. Resultados similares han sido reportados en numerosos análisis energéticos, al comparar diferentes niveles tecnológicos para cultivos específicos (46,47,49), diferentes sistemas agrícolas (25,34)

o, como en este caso, diferentes entradas de energía, independientemente del sistema (5,6,27).

En promedio, un 61,47% de la energía total que entró a los sistemas (Cuadro 14) correspondió a los fertilizantes. El predominio de este rubro dentro del gasto total de energía fue corroborado para sistemas agrícolas de El Salvador (34), China (27), Francia (3) y Estados Unidos (6). En este último país, la producción de fertilizantes representa el 2% de todo el consumo energético (38) y su uso en las fincas constituye un 50% de la energía gastada en la agricultura (6). Blight y colaboradores (6), al analizar el uso de energía en la producción de alimentos, detectaron un incremento en el porcentaje correspondiente a fertilizantes a través del tiempo en todos los países estudiados: India, Japón, E.U.A. y México.

El insumo de mayor correlación lineal positiva con el rendimiento fue la energía gastada en pesticidas, seguida de la de fertilizantes y la de trabajo. Luego la energía de semillas y la de trabajo animal correlacionaron en forma negativa. La de mecanización no se correlacionó en forma significativa (Cuadro 15).

Se observó una alta correlación entre varios de los rubros componentes de la energía total (Cuadro 15). Por esta causa, carece de sentido la prueba de modelos para cada rubro

Cuadro 14. Promedios generales de las variables de cultivo (n = 365).

Concepto	Promedio (Mcal/ha ó indic)	Porcentaje de En. total	Desviación Estándar
ENERGIA INVERTIDA			
Fertilizantes	957,052	61,47	841,35
Trabajo humano	196,130	12,60	91,83
Otros:	403,680	25,93	167,08
Semillas	197,530	12,69	126,10
Pesticidas	184,495	11,85	117,57
Mecanización	17,447	1,12	71,16
Bueyes	4,208	0,27	11,84
TOTAL	1556,862	100,00	965,20
OTRAS VARIABLES MANEJO			
Densidad siembra	153519 pl/ha	---	75930
Duración ciclo	5,63 meses	---	1,68
ENERGIA PRODUCIDA			
Rend./ciclo	9035,639	---	6049,05
Rend./mes	1561,682	---	906,27
EFICIENCIAS			
Salidas/entradas	8,64	---	9,44
Salidas/horas trabajo	20,16	---	19,27

Cuadro 15. Coeficientes de correlación lineal entre algunas variables de cultivo.

	Ener. Total	Ener. Fert.	Ener. Trab.	Ener. Otros	Ener. Sem.	Ener. Pest.	Ener. Mec.	Ener. Bueyes	Dens. Stem.	Dur. Ciclo	Ener. Rend.	Ener. Rend/Mes	S/E	S/Trab
En. Total	--	0,98**	0,61**	0,51**	0,20**	0,55**	-0,06	0,01	0,49**	0,32**	0,46**	0,37**	-0,49**	-0,09
En. Fert.		--	0,51**	0,34**	0,07	0,47**	-0,08	-0,07	0,37**	0,28**	0,46**	0,39**	-0,44**	-0,03
En. Trabajo			--	0,42**	0,31**	0,42**	-0,27**	0,02	0,69**	0,45**	0,37**	0,22**	-0,28**	-0,45**
En. Otros				--	0,62**	0,57**	0,23**	0,43**	0,54**	0,20**	0,15*	0,07	-0,42**	-0,14*
En. Semillas					--	-0,13	-0,18**	0,51**	0,54**	0,20**	-0,27**	-0,24**	-0,43**	-0,50**
En. Pesticidas						--	-0,08	0,00	0,36**	0,48**	0,48**	0,33**	-0,13*	0,13
En. Mecaniz.							--	-0,07	-0,31**	0,04	0,09	0,09	0,01	0,38**
En. Bueyes								--	0,28**	-0,07	-0,28**	-0,31**	-0,21**	-0,23**
Dens. Siembra									--	0,21**	0,14*	0,01	-0,34**	-0,45**
Duración Ciclo										--	0,57**	0,16*	0,16*	0,12
En. Rendim.											--	0,88**	0,24**	0,48**
En. Rend/Mes												--	0,23**	0,55**
Efic. Tot. (S/E)													--	0,47**
Efic. M. de O.														--

** r significativamente diferente de 0 (P ≤ 0,001)

* r significativamente diferente de 0 (P ≤ 0,01)

de energía similares al utilizado para la energía total. Por ejemplo, en una regresión de rendimiento en función del fertilizante, no se puede separar el efecto del trabajo ya que, dada la correlación positiva entre ellos, las parcelas con alto fertilizante tuvieron también alta mano de obra.

Según la metodología usada por Mittelhammer y colaboradores (40) para estimar una función de producción agrícola en Tailandia, se realizó un análisis de componentes principales de los diferentes elementos del manejo (Cuadro A4). La alta relación entre las variables se manifestó en el efecto positivo de todas en el primer componente, el cual correspondió a un 53% de la varianza. El modelo de regresión según este primer componente principal (F_1) fue:

$$y = 8243,94 + 1730,55 F_1 + 299,30 F_1^2$$

significativo al 0,0001, con un R^2 de 0,20; pero el parámetro correspondiente al término cuadrático fue sólo significativo al 5%. Expresado en función de las variables originales estandarizadas, el modelo fue:

$$\begin{aligned} y = & 8243,94 + 728,52 f + 923,78 t + 736,99 o + 569,86 c + \\ & + 861,86 d + 134,52 ft + 107,32 fo + 82,98 fc + \\ & + 125,50 fd + 136,08 to + 105,22 tc + 159,14 td + \\ & + 83,95 oc + 126,96 od + 98,17 cd + 53,04 f^2 + \\ & + 85,28 t^2 + 54,28 o^2 + 32,45 c^2 + 74,24 d^2 \end{aligned}$$

Donde: f = energía de fertilizantes
 t = energía de mano de obra
 o = energía en otros conceptos
 c = duración del ciclo
 d = densidad de siembra.

A pesar de lo complicado del modelo, explicó menos varianza que el que utilizó sólo energía total como variable independiente.

La eficiencia o relación salidas/entradas es una medida muy utilizada en análisis energéticos. Según Heichel (25), las entradas de energía cultural no se transforman en energía cosechable, por lo cual el concepto de eficiencia no se puede usar estrictamente. A pesar de esto, sigue siendo un criterio importante para evaluar la tecnología y el manejo en fincas (27,48). Lo que se hace es calcular calorías de rendimiento/calorías de energía cultural para comparar sistemas según su eficiencia en el uso de ésta y no según el concepto tradicional de eficiencia energética (25).

Entre las parcelas de este estudio, la razón entre salidas y entradas promedio fue de 8,64 y su relación con la energía invertida se esquematizó en la Figura 3. La disminución de la eficiencia al aumentar las entradas de energía ha sido reportada al considerar diferentes sistemas (25,27,34) o diferentes niveles de tecnología en un sistema (5,47,48). El

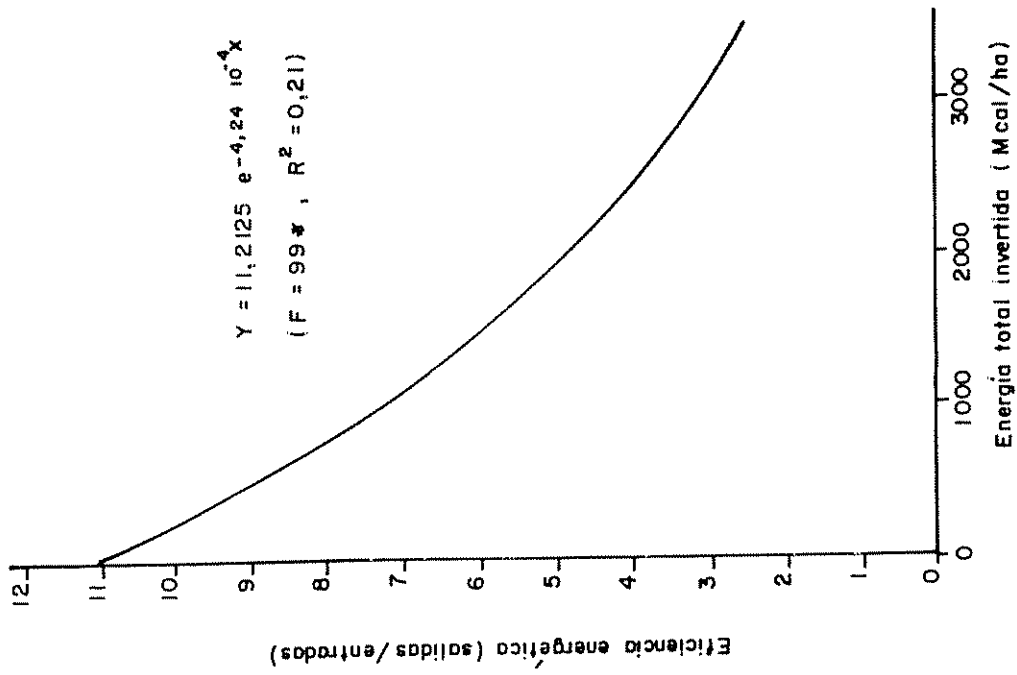
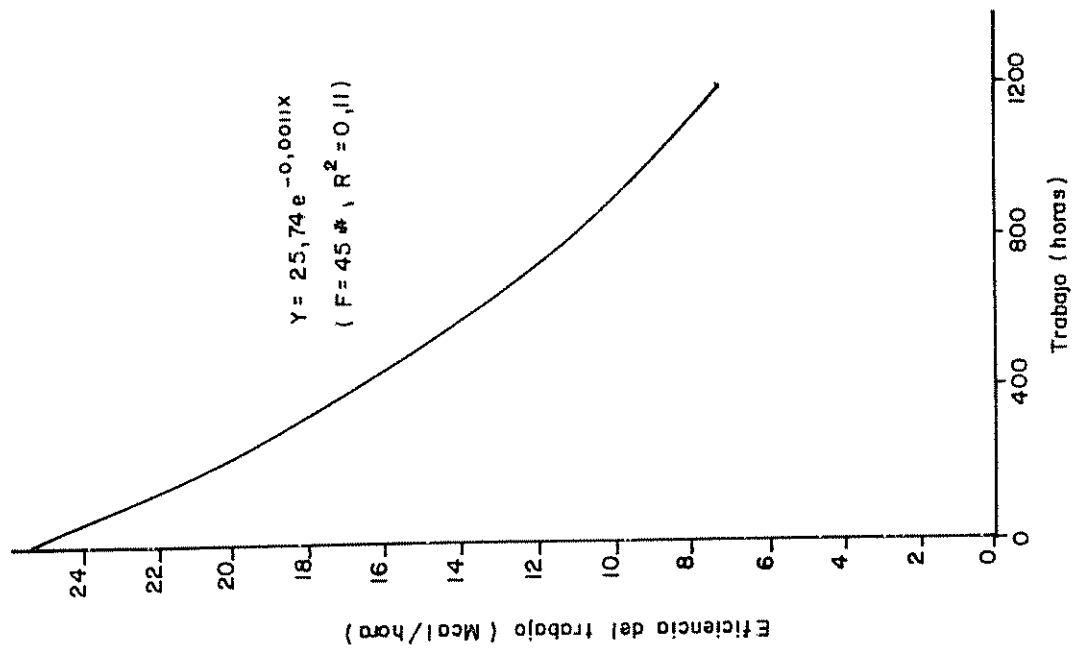


Figura 3. Representación gráfica de los modelos exponenciales de eficiencia.

* significativo con $p = 0,0001$.

aumento en el uso de energía en la agricultura a través del tiempo ha hecho que la eficiencia disminuya (47,47) o a lo sumo, se mantenga constante (6,62). Esto no significa que los sistemas que usan sólo mano de obra, cuyas eficiencias son siempre mayores de 15 (5,25,34,47,48,56) sean mejores, ya que con un sistema así todas las personas deben dedicarse a la agricultura para subsistir (56) y el mundo sólo podría mantener unos diez millones de habitantes (48).

La eficiencia de la mano de obra (Mcal producidas por hora trabajada) varió entre 1,44 y 144,40 con un promedio de 20,16 Mcal/hora y también decreció en forma exponencial negativa al incrementar las horas trabajadas (Fig. 3). Generalmente se asocia una menor eficiencia de la mano de obra con sistemas de baja tecnología, o sea de pocos insumos y muchas horas de trabajo por área (5,47,48). En este estudio, la explicación no fue tan directa. Según las correlaciones lineales (Cuadro 15), la eficiencia de la mano de obra no correlacionó en forma significativa ni con la energía de fertilizantes ni con la energía total. Sólo hubo correlación positiva con la energía de pesticidas ($r = 0,13$; $p < 0,05$) y de mecanización ($r = 0,38$; $p < 0,0001$). La energía de pesticidas aumentó la eficiencia del trabajo a través de un aumento del rendimiento ($r = 0,48$; $p < 0,0001$) y no por una disminución en las horas trabajadas ya que la relación entre estas variar-

bles fue positiva ($r = 0,42$; $p < 0,0001$). En cambio la relación de la energía de la mecanización con el trabajo sí fue negativa ($r = -0,27$; $p < 0,0001$) y su efecto sobre el rendimiento no fue significativo. O sea que sólo en lo que respecta a la energía de mecanización se coincidió con la explicación dada en la literatura y ésta representa sólo el 1,12% de la energía total en promedio.

Todo el análisis energético precedente se hizo sin tomar en cuenta los cultivos componentes de los agroecosistemas. Esto se debió a que no existió en cada uno de los sistemas suficiente variación en la energía invertida como para definir la respuesta a ésta en cada caso. Los promedios de las variables por sistema (Cuadro 16) reflejaron un rendimiento mayor que el promedio sólo en sistemas con más de un cultivo (asociados o en relevo) pero un mínimo consumo de energía total en los monocultivos. Debido a esto la eficiencia energética de todos los cultivos asociados no fue mayor que la de los monocultivos, como en el estudio de Larios (34).

3.2. Relación entre calidad de sitio y producción.

La producción de energía cosechable (y) se relacionó en forma lineal positiva con las dos escalas de calidad de sitio escogidas, según los siguientes modelos:

Cuadro 16. Promedios de energía invertida y producida en cada sistema de cultivo.

	Maíz	Maíz-Sorgo	Sorgo-Frijol	Frijol	Maíz-Vigna	Maíz-Frijol	Maíz-Yuca	Maíz-Sorgo-Frijol
Número de parcelas	124	100	39	35	33	30	3	1
Ener. Fertil. (Mcal/ha)	523,66	1293,10	739,78	469,64	2519,06	744,04	927,96	1167,66
Trabajo humano:								
Horas/ha	316	822	562	406	748	654	672	760
Energía (Mcal/ha)	110,49	287,62	196,70	142,17	261,76	228,96	235,20	266,00
Otros conceptos energía	271,85	431,12	630,96	354,50	514,60	464,21	772,05	282,16
TOTAL	906,00	2011,84	1577,44	966,30	3295,42	1447,21	1935,21	1715,82
Rend. (Mcal/ha)	7941,13	13848,35	3441,64	2431,21	12995,88	6809,02	21177,87	12489,17
Rend./mes (Mcal/ha mes)	1567,50	1895,24	669,86	972,49	2062,84	1700,97	1764,82	1561,15
Efic. ener. (Mcal/Mcal)	9,48	6,88	2,22	2,52	3,94	4,87	10,94	7,28
Efic. trabajo (Mcal/hora)	29,13	16,86	6,14	6,19	17,40	10,59	31,51	16,43

$$y = -1618,92 + 1,19 C_d \quad (p < 0,0001; R^2 = 0,46).$$

$$y = 7200,72 + 226,25 C_i \quad (p < 0,0001; R^2 = 0,33).$$

Donde C_d es la calidad obtenida con el rendimiento como indicador, escogida por su mayor correlación con el mismo y C_i es la calidad independiente del rendimiento, escogida por esta razón. De esta forma se rechazó la hipótesis de que no existe relación entre calidad y rendimiento con una probabilidad de error tipo I de 0,0001.

3.3. Relación entre calidad de sitio y energía invertida.

Se probaron modelos lineales y cuadráticos para buscar la relación entre estas variables. Estos últimos resultaron mejores. Siendo "x" la energía total invertida, el resultado fue el siguiente:

$$x = 1992,96 - 0,27 C_d + 0,00002 C_d^2 \quad (R^2 = 0,20; F = 44 *)$$

$$x = 1318,47 + 2,28 C_i + 0,74 C_i^2 \quad (R^2 = 0,10; F = 21 *)$$

(* significativo con $p = 0,0001$).

Los modelos fueron significativos y se pudo rechazar la hipótesis "no existe relación". Sin embargo, el porcentaje de varianza explicado por la calidad no fue muy alto. En la Figura 4 se puede observar la relación con mayor claridad. Existió una tendencia a utilizar más energía en los sitios de mayor calidad. Esta tendencia se puso en evidencia al com-

- Promedio de entradas en cada intervalo de calidad de sitio
- ▨ Intervalo de \pm desviación standard alrededor de cada media
- Modelo cuadrático de mejor ajuste (ver texto)

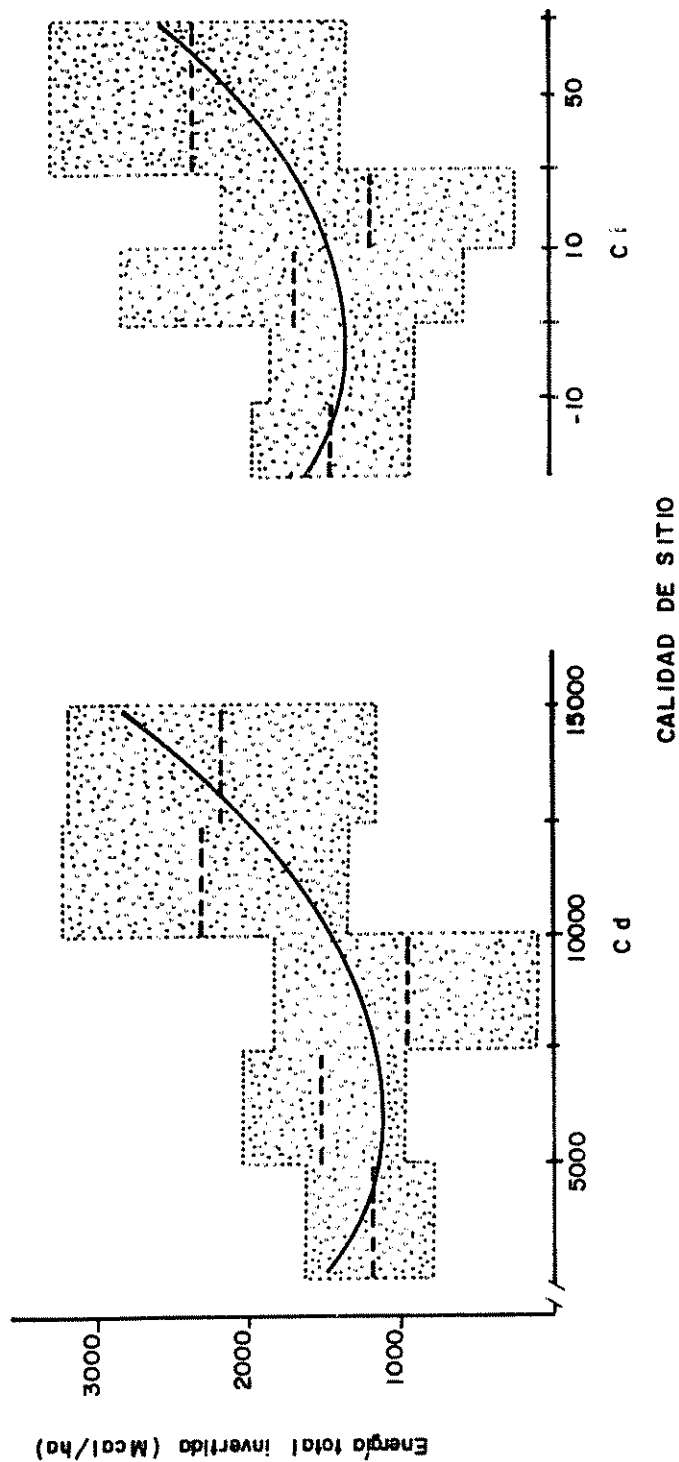


Figura 4. Relación entre la calidad de sitio y la energía invertida en algunos sistemas agrícolas de subsistencia.

parar los dos intervalos de mayor calidad con los demás. Pero al comparar los intervalos de las calidades menores entre sí, no se notó ninguna tendencia. La dispersión de los datos alrededor de la media de cada intervalo fue mayor al aumentar la calidad: mientras en sitios de menor calidad un gran porcentaje de agricultores agregó poca energía, en sitios de mayor calidad la utilización de energía no fue limitada por la calidad del recurso sino por otros factores no medidos.

3.4. Relación entre la calidad de sitio, la energía invertida y la producción.

La búsqueda de esta relación fue el objetivo principal del presente estudio. Se probaron diversos modelos, expresando la energía de rendimiento en función de la energía invertida, la calidad de sitio y la interacción entre ambas. Luego de eliminar los modelos cuyos parámetros no fueron estadísticamente significativos, la forma general de esta relación quedó establecida como:

$$y = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 z + A_4 xz$$

donde y = energía cosechada (Mcal/ha)

x = energía invertida (Mcal/ha)

z = calidad de sitio (Cd o Ci)

En el Cuadro 17 se resumió el resultado de las variantes de este modelo: con las dos calidades de sitio como "z" y con la energía total/ha, energía en fertilizantes/ha o el primer componente principal de las variables de manejo como "x". Todos los modelos fueron significativos ($p = 0,0001$) y explicaron alrededor del 50% de la varianza.

A pesar de la aparente similitud en los modelos, éstos no fueron exactamente iguales. A continuación se explican sus características.

El primer modelo (en función de Cd y energía total) fue el de mayor R^2 y el de interpretación más simple. De la función matemática (Cuadro 17) y de su representación gráfica (Fig. 5) se dedujo lo siguiente.

i. En una calidad dada, el rendimiento respondió en forma cuadrática a la energía invertida. La inclusión de la variable calidad de sitio permitió que los parámetros correspondientes al efecto lineal y cuadrático de la energía total fueran significativos (comparar con modelo $y = f(x, x^2)$ de la sección 3.1.).

ii. A mayor calidad correspondió un mayor rendimiento.

iii. Al incrementar la calidad, hubo mayor respuesta al uso de energía: observar que el máximo de las curvas se obtuvo con cantidades cada vez más altas de energía al aumentar

Cuadro 17. Variantes del modelo general $Y = A_0 + A_1X + A_2X^2 + A_3Z + A_4XZ$ (donde Y es la energía producida/ha, X es la energía invertida y Z es la calidad de sitio).

DEFINICION DE VARIABLES	PARAMETROS DE LA REGRESION							
	Z	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄		
	F modelo	R ² (%)						
Energía total	Cd	118,12***	56,76	-2781,61	4,57***	-0,002***	0,69***	0,0004**
Energía total	Ci	81,00***	47,37	738,11	6,79***	-0,001**	301,40***	-0,045*
Energía fertil.	Cd	102,96***	53,36	-3512,58*	4,86**	-0,002***	1,14***	0,0001
Energía fertil.	Ci	74,62***	45,33	3761,71***	5,42***	-0,0008	283,44***	-0,080**
P1 (a)	Cd	112,21***	55,49	-161,50	-2128,77***	-592,49***	1,14***	0,27***
P1	Ci	71,71***	44,35	8403,28***	1065,23***	-438,05*	223,37***	-3,75

Significancia según pruebas de F (modelo) o de T (parámetros): *** $P \leq 0,0001$; ** $P \leq 0,001$; * $P \leq 0,01$

(a) P1 es el primer componente del análisis de componentes principales de las variables de manejo: ver sección 3.1

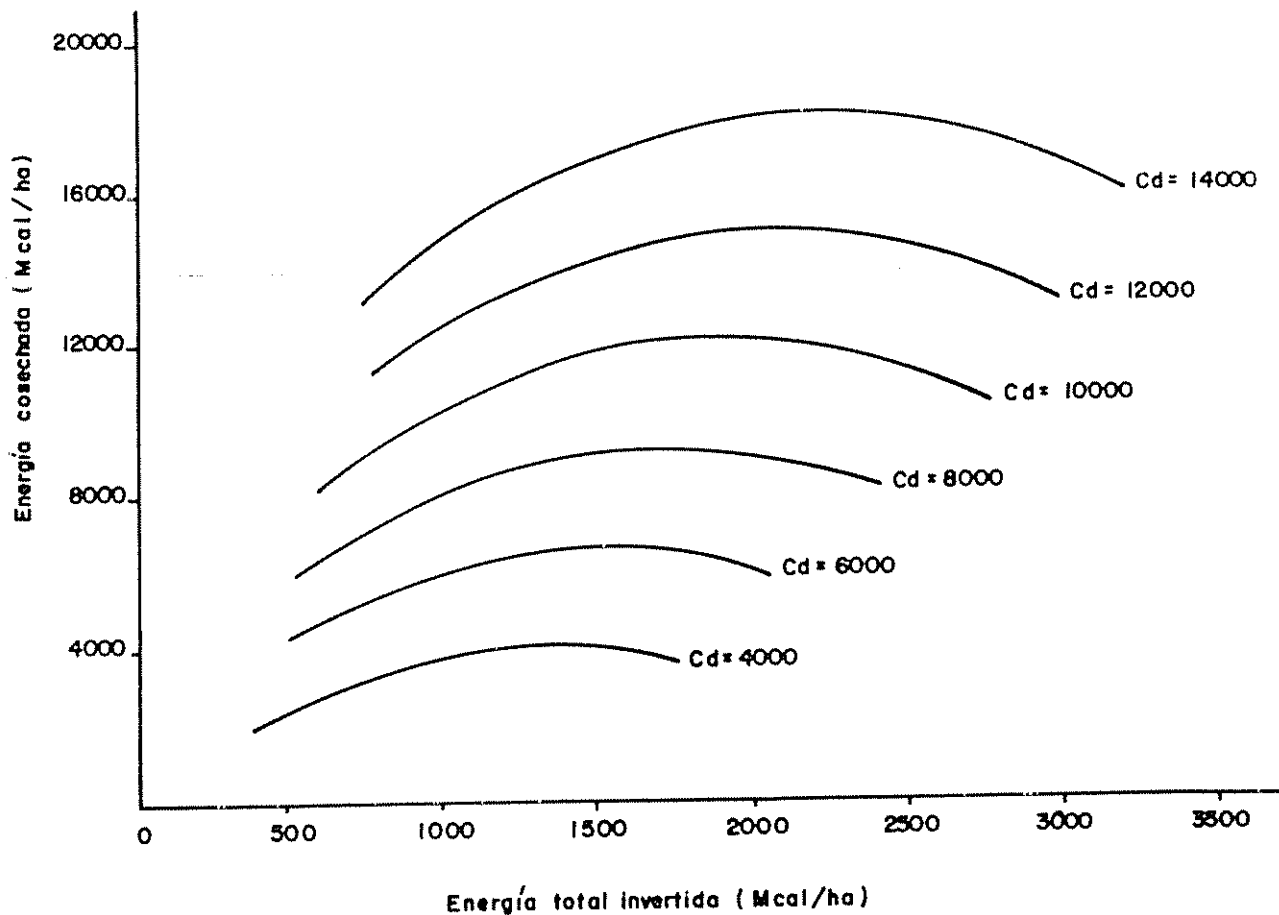


Figura 5. Representación gráfica del modelo:

$$Y = -2871,61 + 4,57X - 0,002X^2 + 0,69Z + 0,0004XZ$$

($R^2 = 0,5676$; $Pr > F = 0,0001$), donde y = rendimiento cosechado

x = entradas totales (ambas en Mcal/ha) y z = calidad de sitio: Cd.

Cd. Esto corroboró en cierta forma a Cd como una medida de la calidad del sitio según los conceptos enunciados por Laker (33), de acuerdo con los cuales tanto el rendimiento como la respuesta a la tecnología deben intervenir en la definición del potencial de un sitio. Sin embargo, la diferente respuesta a la energía en cada calidad no se ajustó exactamente a la teoría de este autor, según la cual hay calidades intermedias que requieren alta tecnología para llegar a un rendimiento similar al de la alta calidad y cuya respuesta es, por lo tanto, mayor y calidades muy bajas que no responden a la tecnología (33). Este modelo reflejaría, así, la comparación entre calidades muy bajas e intermedias.

El modelo en función de energía total y de calidad independiente del rendimiento (Cuadro 17, Fig. 6) también reflejó respuesta cuadrática a la energía total con parámetros significativos y mayor rendimiento a mayor calidad. Pero el parámetro negativo de la interacción (Cuadro 17) se reflejó en la obtención de máximos con cantidades inferiores de energía al aumentar la calidad (Fig. 6). Esta respuesta diferente a la energía en cada Ci indicó que esta calidad concuerda con los conceptos de potencial de Laker (33) y parece reflejar la comparación entre calidades intermedias y altas.

Al comparar los dos modelos se evidenció la diferencia entre las dos escalas de calidad de sitio y se pusieron de

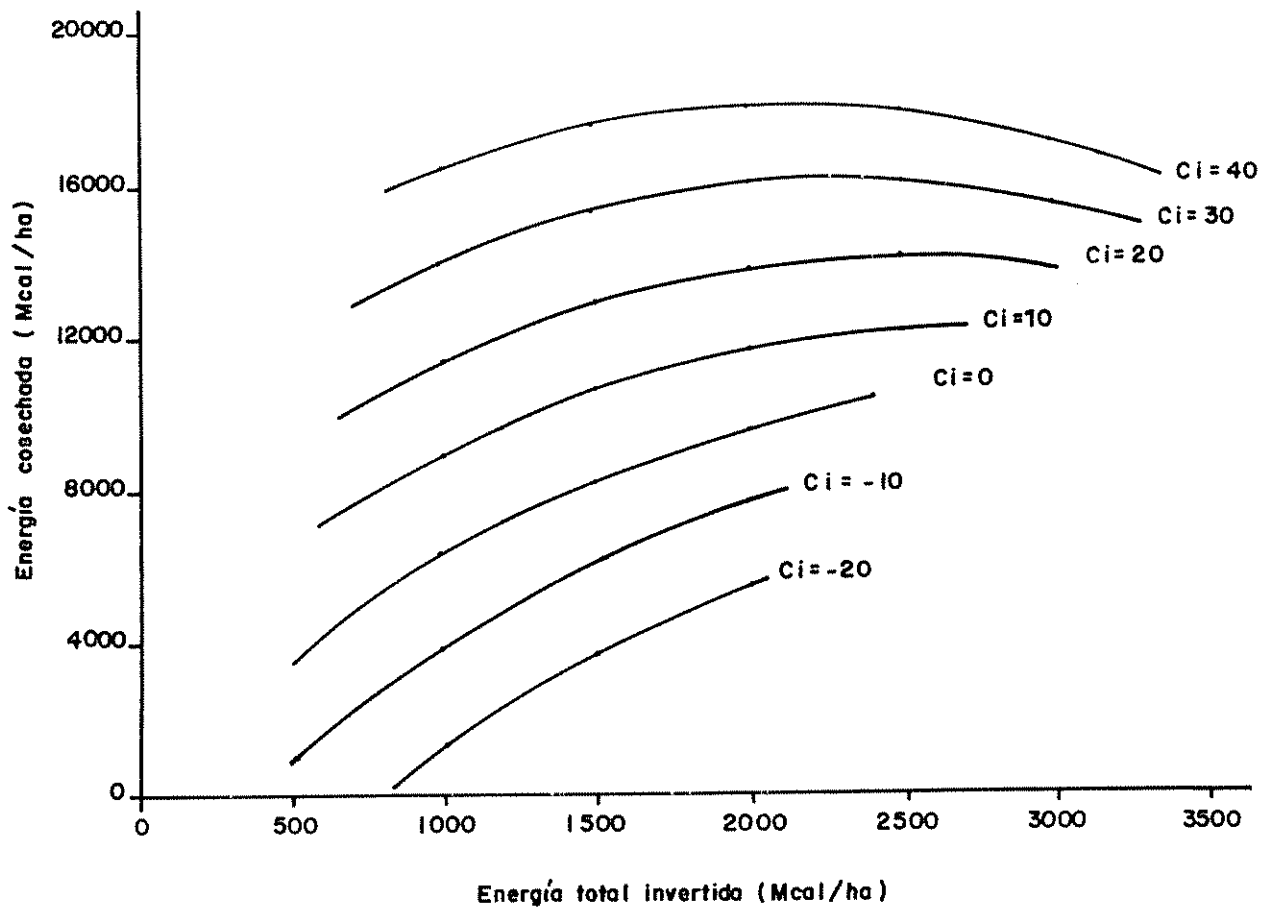


Figura 6. Representación gráfica del modelo:

$$Y = 738,11 + 6,79 X - 0,001 X^2 + 301,40 Z - 0,045 XZ$$

($R^2 = 0,4737$; $Pr > F = 0,0001$), donde y = rendimiento cosechado,
 x = entradas totales (ambas en Mcal/ha) y z = calidad de sitio: Ci.

manifiesto aspectos teóricos sobre la definición de la misma. En ambas escalas, un sitio de alta calidad fue aquel con mayor rendimiento potencial y mayor rendimiento en cualquier nivel dado de energía invertida. Según Cd, mayor calidad también implicó mayor respuesta a los insumos, o sea que las diferencias en rendimiento entre las calidades fueron mayores en niveles altos de energía invertida. En cambio, sitios con alta Ci respondieron menos a los insumos, por lo cual el efecto de la calidad sobre el rendimiento fue más marcado al invertir poca energía y, al invertir mucha, la diferencia entre las calidades fue menor.

La selección de uno de los dos modelos no es, por lo tanto, simple. El primero (con Cd) tuvo mayor R^2 pero en el segundo la calidad fue definida independientemente del rendimiento (no hubo razonamiento circular) y asignó alta Ci a aquellos sitios con mayor rendimiento al invertir poca energía, lo cual parece deseable en sistemas de cultivos de subsistencia.

Los coeficientes de determinación indican que se explicaron las variaciones en el rendimiento sólo en un 57 y 47% con estos modelos. Sin embargo, esto no significa que el intento por expresar la energía de rendimiento en función del ambiente y del manejo fuera infructuoso. El ambiente está compuesto de muchas más características que las cuantificadas

aquí (ver final sección 2.3). La energía total invertida tampoco caracteriza completamente al manejo: es sólo indicadora del mismo. Por ejemplo, el material genético y la densidad de siembra sólo intervinieron indirectamente en el modelo como parte de la energía gastada en semillas. Incluso hay características no cuantificables como la habilidad y experiencia del agricultor. En definitiva, hay muchas fuentes de variación del rendimiento conocidas que no se tomaron en cuenta en estos modelos por diferentes causas (información no disponible, variables no cuantificables, alta correlación entre variables de manejo o dificultad para incluir algunas variables no numéricas) y que pueden explicar, junto con el error experimental, el 40 a 50% de varianza restante.

El tercer modelo del Cuadro 17 (en función de C_d y energía de fertilizantes) fue similar al primero, con un R^2 levemente inferior (0,53) pero el parámetro de la interacción no fue significativo. O sea que el incremento en la respuesta a los insumos al aumentar C_d ya no fue estadísticamente significativo.

Al comparar el cuarto modelo (en función de C_i y de la energía de fertilizantes) con el segundo, se observó un fenómeno similar: la disminución en la respuesta a "x" al aumentar C_i se hizo mayor.

Por lo tanto, en ambos casos, la respuesta a los fertilizantes al aumentar la calidad fue menor (menos positiva o más negativa) que la respuesta a la energía total. Esta conclusión es lógica si la escala de calidad mide, en cierto grado, la fertilidad del suelo.

La similitud de los coeficientes de determinación al utilizar energía total o de fertilizantes en cada "z" se debió a la alta correlación entre estas dos energías (sección 3.1).

Por último, los dos modelos finales del Cuadro 17 fueron un intento por incluir otras variables de manejo a través de su primer componente principal pero no resultó satisfactorio. El primero de ellos (en función de F_1 y Cd) tuvo al menos un parámetro evidentemente sesgado ya que el parámetro del efecto lineal de "x", fue negativo. El sesgo es un riesgo en todas las regresiones de componentes principales (19,39) y hay que tener criterios previos para ver si los estimados son razonables (39). En este caso, ya quedó comprobado el efecto positivo de la inversión de energía, por lo cual no se aceptó el modelo.

El siguiente, en función de C_i y F_1 , tuvo R^2 aún menor que cuando se consideró a la energía de fertilizantes solamente. La complicación de traducir este modelo a las variables originales quedó, así, injustificada.

Las diferencias en la relación entre la eficiencia y la energía invertida al variar la calidad fueron analizadas dividiendo la escala continua de Cd en intervalos. El resultado se resumió en la Figura 7. En todos los intervalos de calidad, el modelo exponencial decreciente fue altamente significativo. Para un nivel dado de energía invertida, la eficiencia fue mayor al aumentar Cd, con la excepción de los últimos intervalos que fueron prácticamente iguales.

3.5. Estimación de la calidad de sitio con variables medidas rutinariamente.

A pesar de que todo el análisis multivariado que dio origen a la escala de calidad es perfectamente reproducible, no siempre se dispone de los datos y de las facilidades de cómputo necesarias. Por esta causa, se consideró que la estimación de la calidad a partir de variables corrientemente medidas en centroamérica puede ser útil para ampliar los alcances de este trabajo.

La variable Cd puede ser estimada con un coeficiente de determinación de 0,7627 a partir de la siguiente función:

$$Cd = - 15658,36 + 1278,49 \text{ temp} - 1,36 \text{ ppan} - 277,29 \text{ pH} - 185,50 \text{ Ca} + 102,99 \text{ Mg} + 597,06 \text{ K.}$$

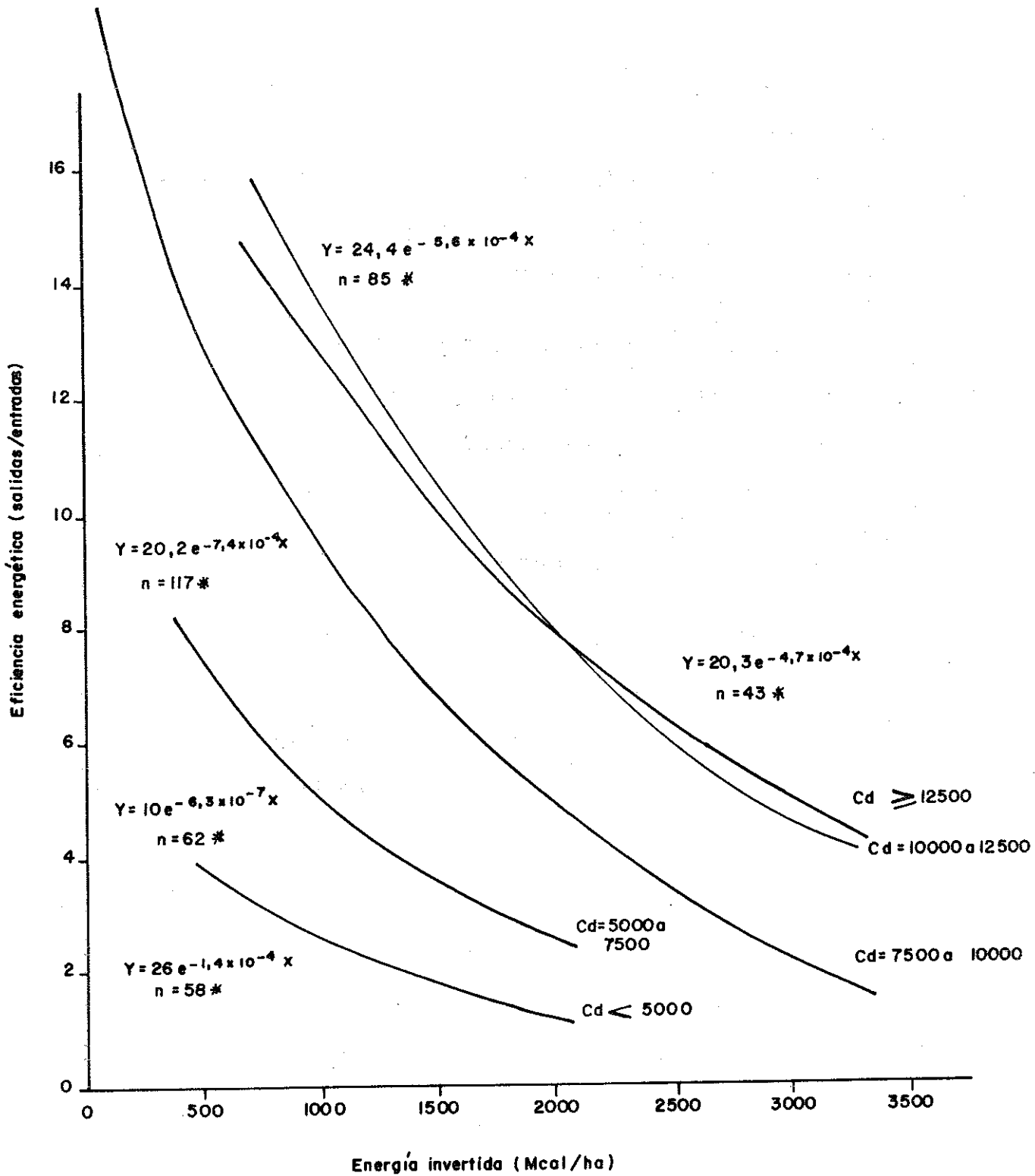


Figura 7. Relación entre la entrada de energía y la eficiencia en cada intervalo de calidad de sitio.

(y = eficiencia, x = entradas, Cd = calidad de sitio, * = significativo con $p \leq 0,001$).

Tanto la temperatura (temp) como la precipitación anual (ppan) son los promedios de la estación meteorológica más cercana; el pH es medido en agua y Ca, Mg y K son en meq/100 ml. Estas variables corresponden al análisis químico de suelos más simple y a datos climáticos generalmente disponibles.

La otra escala de calidad (Ci) puede estimarse con un mayor coeficiente de determinación: $R^2 = 0,8516$. La función (con las mismas variables independientes) es la siguiente:

$$Ci = - 48,92 + 5,055 \text{ temp} - 0,0025 \text{ ppan} - 8,797 \text{ pH} - 0,295 \text{ Ca} + 0,389 \text{ Mn} - 9,790 \text{ K}.$$

En ambos casos, el valor obtenido será relativo: a mayor Cd o Ci, mayor calidad de sitio. Como en cualquier estimación, la extrapolación a regiones muy diferentes a las consideradas en este estudio conduce a errores.

En muchas ocasiones, no se cuenta con ninguna información sobre el análisis de suelo. Dada la importancia de las variables climáticas en la calidad de sitio, reflejada en todo el estudio, se consideró que la asignación de un puntaje a cada zona ecológica permite estimar Cd en forma aceptable. Este puntaje es el promedio de la variable Cd para cada zona ecológica calculado para este archivo:

piso altitudinal	zonas de vida*						
	BS	BS>	BH<	BH	BH>	BMH<	BMH
premontano	5216	5544	7639	6158	4113	3257	3224
basal	12291	11013	13428	-	10017	-	9146

* ver simbología en Fig. 1 y Cuadro 4.

Se observaron valores de calidad mayores en el piso altitudinal basal (tropical) que en el premontano. Dentro de cada piso altitudinal, la calidad promedio fue mayor en el bosque húmedo transición a seco (BH<).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Es necesario uniformar las propiedades del ambiente que se consideran en las caracterizaciones, aunque sea a nivel de CATIE. Para esto se requiere establecer cuáles son las características relevantes para el crecimiento y manejo de los cultivos del área. En este estudio, la temperatura, la precipitación durante el ciclo de cultivo, el Mn, la textura y los cationes intercambiables fueron las más relacionadas con la respuesta de los cultivos. La existencia de una base de datos completa y uniforme sería de gran utilidad para planificar la actividad agrícola de la región.
2. El uso de técnicas de análisis multivariado (análisis de componentes principales, regresión de componentes principales, regresión múltiple, etc.) permitió reducir el espacio multidimensional definido por las variables de suelo y clima a una sola dimensión que, por su relación positiva con la producción de energía cosechable, reflejó la calidad de los sitios para sistemas de cultivo de subsistencia.
3. Según las dos escalas de calidad de sitio escogidas, Ci (obtenida en forma independiente al rendimiento) y Cd (obtenida con el rendimiento como indicador), existió una

- tendencia a invertir más energía en los sitios de mayor calidad.
4. La relación entre la energía total invertida (x) y la cosechada (y) en estos sistemas, fue cuadrática y significativa; pero los parámetros de la regresión no lo fueron.
 5. Al incluir C_d o C_i , los modelos resultantes ya reflejaron un efecto significativo de x , de x^2 y de la interacción entre x y la calidad. O sea que esta última probó ser una fuente de variación importante en el rendimiento.
 6. Según el modelo obtenido en función de C_d [$y = f(x, x^2, C_d, x * C_d)$], en los sitios de mayor calidad hubo mayor producción de energía alimenticia y mayor respuesta a la inversión de energía.
 7. Según el modelo obtenido en función de C_i [$y = f(x, x^2, C_i, x * C_i)$], también hubo mayor rendimiento en los sitios de mayor calidad, pero la respuesta a la energía invertida fue menor.
 8. Estos modelos tuvieron como fin principal explicar las variaciones en el rendimiento de los sistemas de subsistencia en función del manejo (expresado como energía invertida) y del ambiente (cuantificado como C_d o C_i). Su capacidad para predecir la producción está limitada por las características de los datos que les dieron origen: fincas de

subsistencia, cultivo de alimentos básicos y ambientes similares a los utilizados aquí.

9. La metodología usada para definir la calidad de sitio es totalmente reproducible. Sin embargo, si no existen la información o las facilidades necesarias, Cd y Ci pueden ser estimadas a partir de variables comunmente medidas en análisis rutinarios o a partir de promedios obtenidos para las Zonas de Vida. Estas estimaciones permitirían ordenar un conjunto de sitios según su calidad y, haciendo uso de los modelos (con las restricciones apuntadas), definir la energía necesaria para obtener una determinada cantidad de energía cosechable en sistemas de cultivo de subsistencia.

10. Las principales limitaciones de Cd y Ci son: la escasez de datos de propiedades físicas del suelo, el volumen desigual de información para diferentes ambientes y la falta de una dimensión temporal (facilidad de deterioro del sitio).

L I T E R A T U R A C I T A D A

1. ANDERSON, T. W. Introduction to multivariate statistical analysis. New York, Wiley Interscience, 1968. 374 p.
2. AXINN, G. H. y AXINN, N. W. Energy flow on small farms of Nepal: a new approach to comparative analysis of rural family ecosystems. Michigan State University. Staff paper no. 79-23. 1979. [44 p.]
3. BARRIERE, Y. y BERRANGER, F. Coûts énergétiques de quelques cultures du nord de la France. *Agronomie* 2(8): 741-744. 1982.
4. BEEK, K.J. The selection of soil properties and land qualities relevant to specific land uses in developing countries. *In* Workshop on soil resource inventories, Ithaca, N.Y., 1977. Proceedings. Ithaca, N.Y., Cornell University, 1977. pp. 143-162.
5. BLACK, J.N. Energy relations in crop production - a preliminary survey. *Proceedings of the Association of Applied Biologists* 67:273-278. 1971.
6. BLIGHT, G. L. *et al.* Trends in energy usage, energy-food conversion and relative energy efficiency of primary food crops in selected countries. *Indian Journal of Agriculture Science* 52(7):417-424. 1982.
7. BOARDMAN, N. K. The energy budget in solar energy conversion in ecological and agricultural systems. *In* Buvet, R. y Allen, M. J., eds. *Living systems as energy converters*. Amsterdam, New Holland, 1977. pp. 307-318.
8. BORNEMISZA, E. Introducción a la química de suelos. Washington, D. C., OEA, 1982. pp. 59.
9. BRITO, F., COMERMA, J. y CANIZALES, R. Aptitud de las tierras de la zona de Chaguaramas, estado de Monaguas, para la siembra de *Pinus caribea*. *Agronomía Tropical (Venezuela)* 25(4):295-304. 1975.

10. BUOL, S. W. y NICHOLAIDES III, J. J. Constraints to soil fertility evaluation and extrapolation of research results. *In* IRRI, eds. Soil related constraints to food production in the tropics. Los Baños, Filipinas, 1980. pp. 425-438.
11. CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA. CROP PRODUCTION DEPARTMENT. Technical progress report- extension of the pilot project for rural development and contribution to core budget and energy flows in rural communities. Turrialba, Costa Rica, 1982. 29 p. (Serie Institucional. Progress report no. 42)
12. _____. Sistemas de cultivos y la extrapolación de técnicas agrícolas en centroamérica. Turrialba, Costa Rica, en prensa. [195 p.]
13. CHRISTENSEN, D. A. y HEADY, E. O. U.S. agricultural finance response to rising petroleum prices. *Energy in Agriculture* 2:61-74. 1983.
14. DAZHONG, W. y PIMENTEL, D. Energy inputs in agricultural systems of China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 11:29-35. 1984.
15. DIAZ-ROMEU, R. y HUNTER, A. Metodologías de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica, CATIE, 1978. 61p.
16. ESCOBAR, G. y SHENK, M. Validación de dos opciones tecnológicas para el sistema maíz-maíz utilizada por los pequeños agricultores del Atlántico de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE/IPPC, 1981. 36 p. (Serie técnica. Informe técnico no. 23)
17. FASSBENDER, H. W. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, IICA, 1978. 398 p.
18. FLUCK, R. C. Net energy sequestered in agricultural labor. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 24 (6):1449-1455. 1981.
19. FOMBY, T. B. y HILL, R. C. Deletion criteria for principal components regression analysis. *American Journal of Agricultural Economics* 60(3):524-527. 1978.

20. FORSYTHE, W. L. y LOUCKS, O. L. A transformation for species response to habitat factors. *Ecology* 53(6): 1112-1119. 1972.
21. GAVRILYUK, F. Y. History of land capability evaluation and soil rating methods in the USSR. *Soviet Soil Science* 9(2):144-151. 1977.
22. HALL, C. A. S. Energy and ecosystems. New York, Wiley, s.f. En prensa.
23. HEATON, T. B. y BROWN, D. L. Farm structure and energy intensity: another look. *Rural Sociology* 47(1):17-31. 1982.
24. HECKE, E. VAN A regional approach to the analysis of Belgian agricultural energy use and production. *Energy in Agriculture* 1:117-130. 1982.
25. HEICHEL, G. H. Comparative efficiency of energy use in crop production. New Haven, Connecticut Experimental Station, Bulletin no. 739, 1973. 26 p.
26. HOLDRIDGE, L. Ecología basada en zonas de vida. 2a reimpression. San José, Costa Rica, IICA, 1982. 216 p.
27. JIN, Y., LU, M. y SUN, C. Preliminary evaluation of energy consumption in China's agriculture-analysis of two specific cases. *Energy in Agriculture* 1:289-301. 1983.
28. KYUMA, K. y KAWAGUCHI, K. A method of fertility evaluation for paddy soils. I. First approximation: chemical potentiality grading. *Soil Science and Plant Nutrition* 19(1):1-9. 1973.
29. _____. A method of fertility evaluation for paddy soils. II. Second approximation: evaluation of four independent constituents of soil fertility. *Soil Science and Plant Nutrition* 19(1):11-18. 1973.
30. _____. A method of fertility evaluation for paddy soils. III. Third approximation: synthesis of fertility constituents for soil fertility evaluation. *Soil Science and Plant Nutrition* 19(1):19-27. 1973.
31. _____, SUH, Y. y KAWAGUCHI, K. A method of capability evaluation for upland soils. I. Assessment of available water retention capacity. *Soil Science and Plant Nutrition* 23(2):135-149. 1977.

32. _____. Capability considerations for tropical soils. Tropical Agriculture Research Series no. 15:105-117. 1982.
33. LAKER, M. C. Relationships between potential and soil properties. In Workshop on soil resource inventories, Ithaca, N.Y., 1977. Proceedings. Ithaca, N.Y., Cornell University, 1977. pp. 325-335.
34. LARIOS, J. F. Uso de energia en los sistemas de cultivo de maíz y frijol en El Salvador. Turrialba (Costa Rica) 29(2):129-137. 1979.
35. LEACH, G. Energia y producción de alimentos. s.l., Servicio de Publicaciones Agrarias, 1981. 210 p. (Serie estudios/España. Ministerio de Agricultura y Pesca).
36. LEUNG, W-T. W. Food composition table for use in Latin America. Bethesda, Maryland, National Institute of Health, 1961. 145 p.
37. MCCHESENEY, I. G., SHARP, B. M. H. y HAYWARD, J. A. Energy in New Zealand agriculture: current use and future trends. Energy in Agriculture 1:141-153. 1982.
38. MCFATE, K. L. Food and energy: challenges and choices. Energy in Agriculture 1:91-98. 1981.
39. MITTELHAMMER, R. C. y BARITELLE, J. L. On two strategies for choosing principal components in regression analysis. American Journal of Agricultural Economics 59(2):336-343. 1977.
40. _____ et al. Mitigating the effects of multicollinearity using exact and stochastic restrictions: the case of an aggregate agricultural production function in Thailand. American Journal of Agricultural Economics 62(2):199-210. 1980.
41. NORUM, L. Problem formulation and quantification in energy analysis. Energy in Agriculture 2:1-10. 1983.
42. ODUM, H. T. Energy analysis of the environmental role in agriculture. In Stanhill, G., ed. Energy and Agriculture. New York, Springer-Verlag, 1984. pp. 24-51.

43. ORTEGA-SASTRIQUES, F. y SANCHEZ GARCIA, J. Hacia una clasificación automática de suelos: necesidad y principios. *Ciencias de la Agricultura (Cuba)* no.5:51-61. 1980.
44. PAGE, G. Quantitative evaluation of site potential for spruce and fir in Newfoundland. *Forest Science* 22(2): 131-143. 1976.
45. PATTERSON, G. T. y MACKINTOSH, E. E. Relationship between soil capability class and economic returns from grain corn production in southwestern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science* 56:167-174. 1976.
46. FIMENTEL, D. et al. Food production and the energy crisis. *Science* 182:443-449. 1973.
47. _____. Food, nitrogen and energy. In International symposium on nitrogen fixation, 1st, s.l., 1976. *Proceedings*. s.l., Washington State University Press, 1976. pp. 656-673.
48. _____ y TERHUNE, E. C. Energy and food. *Annual Review of Energy* 2:171-195. 1977.
49. _____. Energy budgets in natural and agricultural systems. In Buvet, R. y Allen, M. J., eds. *Living systems as energy converters*. Amsterdam, North Holland, 1977. pp. 299-306.
50. _____. Energy inputs for the production, formulation, packaging and transport of various pesticides. In _____, ed. *Handbook of energy utilization in agriculture*. Boca Raton, Fla., CRC Press, 1980. pp. 45-47.
51. _____ y FIMENTEL, M. Impact of the energy crisis on food and nutrition systems. In Santos, W. et al., eds. *Nutrition and food science*. s.l., Plenum, 1980. v. 1, pp. 71-83.
52. _____, BERARDI, G. y FAST, S. Energy efficiency of farming systems: organic and conventional agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 9:359-372. 1983.
53. PLATEN, H. VON, RODRIGUEZ F., G. y LAGEMANN, J. *Sistemas de finca en Acosta-Puriscal, Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica, CATIE, 1982. 146 p.

54. PORTER, G. Introduction: living systems as energy converters. In Buvet, R. y Allen, M. J., eds. Living systems as energy converters. Amsterdam, North Holland, 1977. pp. 1-4.
55. FROTZ, R. Soil properties important for various tropical crops: Pahang Tenggara master planning study. In Workshop on soil resource inventories, Ithaca, 1977. Proceedings. Ithaca, N.Y., Cornell University, 1977. pp. 177-188.
56. RAPPAPORT, R. A. The flow of energy in an agricultural society. *Scientific American* 225:117-122, 127-132. 1971.
57. ROSA, D. DE LA y CARLISLE, V. W. An approach to the classification of agricultural and nonagricultural soil evaluation systems. *Anales de Edafología y Agrobiología* 38(11/12):2027-2037. 1979.
58. _____ y ALMORZA, J. Programa de ordenador para automatizar la aplicación de un sistema de evaluación de suelos. *Anales de Edafología y Agrobiología* 39(1/20):297-300. 1980.
59. SANCHEZ, P. A. y BUOL, S. W. Soils of the tropics and the world food crisis. *Science* 188:598-603. 1975.
60. _____. Suelos del trópico: características y manejo. San José, Costa Rica, IICA, 1981. 660p.
61. _____, COUTO, W. y BUOL, S. W. The fertility capability soil classification system: interpretation, applicability and modification. *Geoderma* 27:283-309. 1982.
62. SMIL, V., NACHMAN, P. y LONG II, T. V. Technological changes and the energy cost of U.S. grain corn. *Energy in Agriculture* 2:177-192. 1983.
63. SOIL SURVEY STAFF. Soil survey manual. USDA handbook no. 18, Washington DC, 1951. p. 503.
64. SUH, Y., KYUMA, K. y KAWAGUCHI, K. A method for capability evaluation for upland soils. IV. Fertility evaluation and fertility classification. *Soil Science and Plant Nutrition* 23(3):275-286. 1977.
65. TIENHOVEN, N. VAN, ICAZA G., J. y LAGEMAN, J. Sistemas de finca en Jinotega, Nicaragua. Turrialba, Costa Rica, CATIE, 1982. 175 p.

66. WALKER, B. H. y WEHRHAHN, C. F. Relationships between derived vegetation gradients and measured environmental variables in Saskatchewan Wetlands. *Ecology* 52(1):85-91. 1971.
67. WARNKEN, F. F. Impact of rising energy costs on traditional and energy intensive crop production: the case of Nicaragua. *Canadian Journal of Agricultural Economics* 24(2):15-22. 1976.
68. WEBSTER, R. Quantitative and numerical methods in soil classification and survey. Oxford, Clarendon Press, 1977. 296 p.
69. ZANDSTRA, H. G. et al. A methodology for on farm cropping systems research. Los Baños, Filipinas, IRRI, 1981. pp. 3-6.

A P E N D I C E

Cuadro A2. Matriz de correlación entre las variables de suelo y clima a nivel de área (n = 59).

	Alt.	Temp	pH	P	Ca	Mg	K	Cu	Zn	Mn	Fe	M.O.	Pend.	Are.	Arg.	pp cic	Ca/P	Mg/K	Ca+Mg/K	Mg/Ca
temperatura	0,32*	0,57*	-0,63	0,02	-0,48*	-0,52	-0,34	-0,19	0,20	0,49	-0,16	-0,30	-0,53*	-0,09	0,47	0,74*	0,03	-0,04	0,01	-0,21
Altitud	--	0,50*	0,34	0,04	0,41	0,42	0,28	0,04	-0,23	-0,40	0,07	0,24	0,67*	-0,02	-0,29	-0,70	-0,06	0,05	0,01	0,21
pp anual	--	--	-0,52*	-0,21	-0,43	-0,56*	-0,32	0,24	0,44	0,27	0,37	0,31	-0,11	-0,15	0,22	0,71*	-0,05	-0,17	-0,09	-0,40
pH	--	--	--	0,27	0,47	0,49*	0,56*	-0,25	-0,17	-0,63	-0,32	-0,11	-0,06	0,44	-0,63*	-0,58*	-0,09	0,01	-0,06	0,10
P	--	--	--	--	0,25	0,14	0,43	-0,22	0,03	-0,21	-0,26	-0,15	-0,13	0,27	-0,29	-0,21	-0,18	-0,21	-0,19	-0,16
Ca	--	--	--	--	--	0,85*	0,30	-0,23	-0,34	-0,52*	-0,31	-0,02	0,26	0,07	-0,23	-0,60*	0,41	0,39	0,41	0,01
Mg	--	--	--	--	--	--	0,21	-0,13	-0,39	-0,46	-0,37	-0,17	0,04	0,02	-0,23	-0,58*	0,41	0,57*	0,47	0,48*
K	--	--	--	--	--	--	--	0,02	0,06	-0,30	-0,03	-0,03	0,05	0,49*	-0,54*	-0,43	-0,57*	-0,52*	-0,56*	-0,09
Cu	--	--	--	--	--	--	--	--	0,32	0,28	0,71*	0,28	0,08	0,10	-0,24	0,10	0,18	-0,12	-0,17	0,03
Zn	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,30	0,41	0,28	0,00	0,06	-0,06	0,32	-0,24	-0,28	-0,25	-0,22
Mn	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,22	-0,12	-0,14	-0,10	0,43	0,45	-0,09	-0,09	-0,09	0,06
Fe	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,50*	0,26	0,10	-0,22	0,07	-0,21	-0,28	-0,25	-0,24
Mat. Orgánica	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,48*	-0,06	-0,20	-0,01	0,01	-0,09	-0,01	-0,37
Pendiente	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,19	-0,04	0,43	0,14	0,03	0,11	-0,25
Arena	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,77*	-0,35	0,44	-0,40	-0,43	-0,17
Arcilla	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,49*	0,34	0,27	0,32	0,12
pp ciclo	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,08	-0,13	-0,10	-0,07
Ca/P	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,92*	0,99*	0,10
Mg/K	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,96*	0,41
(Ca+Mg)/K	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,20

* Coeficiente de correlación significativamente diferente de 0 (P ≤ 0,0001)

Coeficiente de correlación significativamente diferente de 0 (P ≤ 0,01)

Cuadro A3. Matriz de correlación entre las variables de suelo y clima a nivel de zona (n = 18).

Alt.	pH	pH	P	Ca	Mg	K	Cu	Zn	Mn	Fe	N.O.	Arc.	Ca/Hg	Hg/Ca
temperatura	0,46	-0,37	-0,08	-0,60	-0,54	-0,49	-0,37	0,13	0,43	-0,35	-0,37	3,47	0,01	-0,10
Altitud	-0,53	0,31	0,12	0,56	0,50	0,48	0,14	-0,21	-0,34	0,19	0,21	9,24	0,01	0,22
pH	..	-0,51	-0,47	-0,51	-0,63	-0,44	0,29	0,46	0,11	0,38	0,45	-0,07	0,11	0,35
P	0,63	0,35	0,40	0,70	0,28	-0,35	-0,65	-0,34	0,15	0,60	0,33	-0,15
Ca	0,46	0,33	0,57	-0,34	-0,32	-0,39	-0,47	0,3	0,15	-0,26	0,06
Mg	0,92*	0,42	-0,06	-0,46	-0,54	..	0,06	-0,05	0,48	0,14
K	0,43	-0,10	-0,55	-0,42	-0,24	-0,25	-0,02	0,44	0,48
Cu	0,21	-0,09	-0,38	0,09	-0,17	-0,67	-0,53	0,16
Zn	0,60	0,31	0,41	-0,41	-0,28	-0,18
Mn	0,67	0,46	-0,21	-0,38	-0,39
Fe	0,22	0,35	-0,07	0,19
Nit. org.	0,29	-0,29	-0,35
Arcilla	-0,26	0,06	-0,63
Ca/Hg/Fe

* r significativamente diferente de 0 (P < 0,001)

† significativamente diferente de 0 (P < 0,01)

Cuadro A4. Análisis de componentes principales de algunas variables de cultivo (n = 365)

	C O M P O N E N T E S P R I N C I P A L E S				
	Primero	Segundo	Tercero	Cuarto	Quinto
Valor propio	2,6525	0,8972	0,6571	0,5557	0,2376
Proporción varianza	0,5305	0,1794	0,1314	0,1111	0,0475
Prop. var. acumulada	0,5305	0,7099	0,8413	0,9525	1,0000

VARIABLES	VECTORES PROPIOS				
Energía de fertilizantes	0,4210	0,1344	-0,8583	0,2063	0,1599
Energía de trabajo	0,5338	0,0944	0,0350	-0,4621	-0,7010
Otros conceptos energía	0,4259	-0,4464	0,2745	0,7122	-0,1916
Duración del ciclo	0,3293	0,8013	0,3832	0,2202	0,2326
Densidad de siembra	0,4980	-0,3628	0,1999	-0,4338	0,6263