

INDICADORES PARA EL USO DE LA TIERRA: EL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO REVENTADO, COSTA RICA

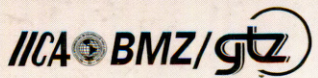


5

BRN-1
3797

SABINE MÜLLER, JORGE NÚÑEZ, LAURA RAMÍREZ

SERIE DOCUMENTOS DE DISCUSIÓN SOBRE
AGRICULTURA SOSTENIBLE Y RECURSOS NATURALES



Para Nelson Rojas
con aprecio de
Laura Ramírez

IICA



BMZ/gtz

**INDICADORES PARA
EL USO DE LA TIERRA:
EL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO
REVENTADO, COSTA RICA**

**SABINE MÜLLER, JORGE NÚÑEZ
LAURA RAMÍREZ**

*Proyecto IICAIGTZ sobre Agricultura,
Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible*

© Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) /
Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
Marzo, 1998.

Derechos reservados. Prohibida la reproducción total o parcial de este documento
sin autorización escrita del IICA y la GTZ.

Las ideas y los planteamientos contenidos en los artículos firmados son propios de
los autores y no representan necesariamente el criterio del IICA y la GTZ.

El Servicio Editorial y de Idiomas del IICA fue responsable por la revisión estilística
y edición de esta publicación, y la Imprenta del IICA por el diagramado, montaje,
fotomecánica e impresión.

Editor encargado de la serie: Máximo Araya.
Arte de portada: Claudia Eppelin.

Indicadores para el uso de la tierra: el caso de la cuenca del río
Reventado, Costa Rica / Sabine Müller, Jorge Núñez, Laura
Ramírez. - San José, C.R.: Instituto Interamericano de
Cooperación para la Agricultura : Deutsche Gesellschaft für
Technische Zusammenarbeit, 1998.

xi, 58 p. ; 23 cm. - (Serie Documentos de Discusión sobre
Agricultura Sostenible y Recursos Naturales / IICA, ISSN 0253-2623 ;
no. A1/SC-98-01)

ISBN 92-9039-352 1

1. Utilización de la tierra - Costa Rica. 2. Indicadores.
I. Núñez, Jorge. II. Ramírez, Laura. III. IICA. IV. GTZ.
V. Serie. VI. Título.

Agris
E11

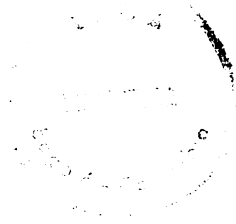
Dewey
333.76

SERIE DOCUMENTOS DE DISCUSION
SOBRE AGRICULTURA SOSTENIBLE
Y RECURSOS NATURALES

ISSN-1027-2623
A1/SC-98-01

Marzo, 1998
San José, Costa Rica

IICA
SD DASEN-7
MEN-3797
1998



CONTENIDO

PROLOGO	v
AGRADECIMIENTOS	vii
SIGLAS	ix
RESUMEN	xi
INTRODUCCION	1
EL CONCEPTO DE INDICADORES Y CRITERIOS PARA SU SELECCION	3
DESCRIPCION DEL AREA DE INVESTIGACION	7
DEFINICION DE LOS INDICADORES	9
Bosquejo de los Impactos del Uso de la Tierra sobre las Características del Suelo en el Area de Investigación	9
Identificación de los Indicadores	11
PROCEDIMIENTO DEL TRABAJO DE CAMPO	17
DISCUSION DE LOS RESULTADOS EMPIRICOS	19
Taxonomía de los Suelos de Acuerdo con los Perfiles Analizados	19
Análisis de los Diferentes Indicadores	22
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41



indicadores para el uso de la tierra

ANEXO 1.

Clasificación de Algunos de los Perfiles de los Suelos
Más Representativos del Area de Investigación 45

ANEXO 2.

Mapa Base de Suelos de Tierra Blanca
y Llano Grande de Cartago, Costa Rica 53

BIBLIOGRAFIA 55

PROLOGO

Desde 1993, en el marco del Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible, se ha venido ejecutando una investigación sobre indicadores de sostenibilidad, que son la base para la realización de evaluaciones de la agricultura y del desarrollo sostenible.

El objetivo de dicha investigación es desarrollar métodos de definición de indicadores para evaluar y dar seguimiento a la sostenibilidad de intervenciones en el sector agrícola y de los recursos naturales. El concepto de sostenibilidad utilizado abarca no sólo el ambiente ecológico, sino también el social y el económico. Los métodos deben posibilitar la deducción de indicadores para los análisis preliminares y posteriores, así como el monitoreo de programas y proyectos.

Para esta finalidad, se ha visto la necesidad de contemplar los indicadores a diferentes niveles: país, región, finca y parcela. Los niveles regionales y locales han sido trabajados en un estudio de caso en la cuenca del río Reventado, Costa Rica.

Los resultados de la investigación se están publicando, de acuerdo con su avance, en una serie de documentos de discusión. En este contexto, el presente documento trata los posibles impactos del uso de la tierra sobre la calidad de los suelos de la cuenca.

Este documento constituye un trabajo en proceso; por lo tanto, deseamos recibir comentarios que permitan su revisión y ampliación, en beneficio de una definición útil de indicadores para el fortalecimiento de una agricultura sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Programa de Apoyo en Ecología Tropical para Mejorar el Instrumental de Cooperación para el Desarrollo (TÖB) de la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

El trabajo de campo y los análisis de laboratorio fueron posibles gracias al apoyo de las instituciones cooperantes del estudio, el Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible, el ITCR, el MAG de Costa Rica y la cooperativa COOPETIERRABLANCA. Especial agradecimiento merecen los agricultores de Tierra Blanca y Llano Grande por su colaboración para realizar este estudio. Finalmente, los autores agradecen el continuo apoyo del personal del Proyecto IICA-GTZ.

SIGLAS

CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
COOPETIERRABLANCA	Cooperativa de Tierra Blanca (Costa Rica)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
ITCR	Instituto Tecnológico de Costa Rica
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería (Costa Rica)
TÖB	Programa de Apoyo en Ecología Tropical para Mejorar el Instrumental de Cooperación para el Desarrollo (GTZ)
UCR	Universidad de Costa Rica
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

RESUMEN

Dentro del marco del proyecto de investigación sobre indicadores de sostenibilidad, el objetivo del presente estudio fue analizar el impacto del uso de la tierra sobre la calidad de los suelos en la cuenca media del río Reventado en Costa Rica.

Para tal fin se identificaron indicadores de calidad de suelo, que permitieran medir cambios de las características del suelo en función del uso de la tierra. Dado que no existían áreas sin uso agropecuario en el área de investigación, se compararon dos tipos de uso agropecuario que diferían en términos de la intensidad de la intervención humana: áreas usadas como potreros para una ganadería extensiva y áreas dedicadas a un uso intensivo de producción hortícola.

El contenido de materia orgánica, el índice estructural del suelo, la erosión visible, el grosor del horizonte A y los indicadores que medían la acidez (pH y contenido de aluminio) cumplieron con los criterios de selección de los indicadores y permitieron medir cambios relacionados con el tipo de uso.

De acuerdo con los resultados del estudio, la producción intensiva de hortalizas, tal como se está practicando en el área de investigación, conduce a una degradación de los suelos que se manifiesta en pérdida de materia orgánica, aumento de la erosión, deterioro de la estructura del suelo y aumento de su acidez. La degradación del suelo, a su vez, tiene impactos negativos sobre la productividad y la producción de hortalizas, afectando también la dimensión económica de la sostenibilidad.

INTRODUCCION

La literatura del desarrollo sostenible muestra una gran variedad de definiciones y conceptos, "de manera tal que casi cualquiera encontrará una que coincida con sus necesidades." (Goodland y Redcliff 1991). Esta misma observación es válida para los conceptos de agricultura sostenible. Sin embargo, lo que la mayoría de las definiciones de agricultura sostenible tienen en común es *la necesidad de mantener el potencial de producción agrícola*, es decir, la conservación de una cierta base de recursos naturales con una calidad suficiente para hacer posible la producción continua de alimentos y fibras.

Existe consenso de que el suelo, por ser parte de esta base de recursos indispensable para la producción agropecuaria, debe considerarse cuando se pretende analizar la sostenibilidad de dicha base.

Por lo tanto, el análisis de la calidad de los suelos y su posible degradación por el uso de la tierra ha sido un tema central de la investigación. Para tal fin se identificaron indicadores que describen la calidad del suelo y con los cuales se esperaba poder medir cambios causados por la agricultura. La información para el cálculo de los indicadores tenía que levantarse en el campo a través de sondeos y encuestas. Además, durante este proceso, el conjunto de indicadores derivados por la teoría tenía que ajustarse a la realidad de la zona.

Este documento está dividido en siete secciones. Después de la Introducción, se resumen brevemente algunos aspectos importantes de la metodología general para la definición de los indicadores. Sigue una descripción del área de investigación. La cuarta sección discute los indicadores seleccionados y la quinta describe el procedimiento del levantamiento de la información. La sexta sección analiza los resultados empíricos y la última presenta algunas conclusiones respecto a la metodología, los indicadores usados y la situación en la cuenca.

EL CONCEPTO DE INDICADORES Y CRITERIOS PARA SU SELECCION

Los indicadores pueden definirse como herramientas para agregar y simplificar la información de una naturaleza compleja de una manera útil y ventajosa (Adriaanse 1993). Son instrumentos para apoyar la toma de decisiones; es decir, proveen información en relación con el pasado y los posibles impactos futuros de las mismas. Por lo tanto, un indicador de sostenibilidad es un número o cualidad que pone en manifiesto el estado o condición de un proceso o fenómeno dados en relación con la sostenibilidad.

Los indicadores pueden consistir de una sola variable, de algunas variables o de un índice; éste se define como la proporción entre los valores de una variable en diferentes momentos, y también puede ser construido a partir de la razón entre diferentes variables.

Con el fin de evitar que los indicadores se seleccionen de manera muy subjetiva o al azar, es importante hacer transparente el proceso de su selección. Se deben revelar claramente los criterios y supuestos implícitos de su definición.

En el presente estudio, la identificación de los indicadores se hizo de acuerdo con el siguiente esquema:

- Primero se identificaron y analizaron las características más importantes, para su sostenibilidad, del sistema bajo análisis.
- En un segundo paso se preguntó cuáles fenómenos naturales e intervenciones del hombre pueden haber afectado al sistema, por ejemplo el tipo de cultivo o la manera de preparación del suelo.
- En un tercer paso se examinó cuáles de las características del sistema, identificadas como importantes para su sostenibilidad, pueden estar afectadas por estas intervenciones.
- Para estas características se buscaban indicadores que permitieran medir sus *cambios*.

Normalmente no es suficiente un solo indicador para todo el sistema, sino que se requiere un conjunto de indicadores que describen los cambios

indicadores para el uso de la tierra

en las diferentes características de un sistema importantes para su sostenibilidad. Tampoco existen indicadores universales para todos los sistemas, sino que los indicadores se definen de acuerdo con las propiedades específicas del sistema bajo análisis.

Por otro lado, muchas veces se encuentran varios indicadores que pueden relacionarse con una sola característica determinada, pero no todos tienen el mismo valor en términos de su significancia para el problema que se quiere analizar. Hay indicadores cuyo valor cambia relativamente rápido; por ejemplo, si se quiere analizar el impacto de la ganadería, el indicador "compactación" del suelo puede comprobarse en pocos años, mientras otros indicadores requieren un tiempo más largo antes de poder observar un cambio significativo, como lo es un cambio en la microfauna del suelo. Considerando que los recursos disponibles para un análisis de sostenibilidad son limitados en la mayoría de los casos, la relación *eficacia/costo* de un indicador es un criterio importante para su selección.

De manera general se puede decir que los indicadores tienen que mostrar las siguientes cualidades para poder cumplir con su función:

- Deben ser sensibles a los cambios del sistema; es decir, si el sistema pasa por un proceso de degradación, los indicadores deben reflejar este cambio rápidamente.
- Deben dar una explicación significativa con respecto a la sostenibilidad del sistema bajo análisis.
- Deben ser relativamente fáciles de medir y su definición debe ser eficiente desde un punto de vista de costos.
- Debe ser posible repetir las mediciones a lo largo del tiempo.

Los indicadores miden cambios que pueden ser causados por procesos naturales (los sistemas naturales no son estáticos sino en continuo desarrollo) o por intervenciones del hombre, y estos últimos son el centro de interés del análisis de la sostenibilidad. La observación de un cambio implica que el valor estimado de un indicador determinado debe compararse con algún valor que refleja la situación antes de la intervención del hombre o una situación "sostenible"; por ejemplo, el valor del mismo indicador hace 20 años o el valor del mismo indicador de un sistema

concepto de indicadores y criterios para su selección

parecido pero no alterado. La definición de estos valores de comparación es muy importante porque la evaluación de la sostenibilidad de un sistema depende en última instancia de los elementos con los cuales se están comparando.

DESCRIPCION DEL AREA DE INVESTIGACION

La cuenca media del río Reventado está localizada en Cartago, Costa Rica, y tiene un área de 2152 ha de suelos volcánicos, con laderas pronunciadas y laderas inestables. El lecho del río principal tiene 12 km de largo, y es un típico río de montaña de 1 a 2 m de ancho y 15 cm de profundidad durante la estación seca y unos 5 m de ancho durante la estación lluviosa. El nacimiento del río se ubica 2 km al sureste del principal cráter del volcán Irazú, que está a una altura de 3432 msnm. La precipitación anual es de 1700 mm, con una estación seca de diciembre a abril. La temperatura promedio es de 13°C, la cual varía de acuerdo con la altitud y la estación.

La parte alta de la cuenca, en su mayoría, está cubierta con bosques secundarios; hay unos pocos sitios de bosque primario, en el parque Prusia. Las áreas fuera del parque se utilizan en pastos para ganadería extensiva. Las partes media y baja de la cuenca están cultivadas fundamentalmente con cultivos anuales, incluso en laderas empinadas con ámbitos de 5 a 70 por ciento.

El área de investigación se encuentra localizada en la parte media de la cuenca, que es el área con mayor intensidad de producción hortícola, con límites al norte: Parque Nacional Prusia; al sur: Misión Norte en Tierra Blanca; al este: Potrero Cerrado; y al oeste: Los Angeles de Llano Grande. El área de la cuenca media del río Reventado mide 2152 ha, la altitud oscila entre 1838 y 2546 msnm y pertenece a la zona de vida de bosque húmedo Montano Bajo (Holdridge 1987). Administrativamente, el área de estudio abarca parte del distrito 8 de Tierra Blanca y del distrito 10 de Llano Grande, del cantón primero de la provincia de Cartago, Costa Rica (CNDTA 1985).

Durante los últimos 40 años, en el área de investigación se ha observado un cambio en el uso de la tierra en forma de una extensión del área de producción hortícola en detrimento del área de pasto. La gran mayoría de los agricultores son propietarios y cultivan un promedio de tres hectáreas (las fincas varían de 0.25 a 50 ha) con productos hortícolas (papa, cebolla, zanahoria, repollo, frijoles, etc.). El uso de la tierra es muy intensivo, con dos y, en algunos casos, hasta tres cosechas por año. Una parte significativa de los agricultores usan riego durante la época seca. El uso de fertilizantes y plaguicidas es relativamente alto y la mayor parte de las fincas están parcialmente mecanizadas (se alquilan tractores para

indicadores para el uso de la tierra

arar los terrenos). La mayoría de los agricultores usan las acequias de ladera como única medida de conservación de suelo, las que reubican según la experiencia adquirida en cada cosecha.

Con base en esta información, se pueden formular algunas hipótesis sobre los posibles impactos del uso de la tierra sobre el recurso suelo:

- La producción continua de cultivos anuales, con largos períodos de poca cobertura vegetal en laderas ligeras y hasta muy pronunciadas, desemboca en una degradación física y química de los suelos, pérdida de suelo (horizonte A), cambio de la estructura, pérdida de nutrientes, etc.
- La alta proporción de tubérculos en la rotación y las prácticas culturales (quema de residuos, preparación del terreno) conduce a un empobrecimiento de los suelos en materia orgánica.
- La productividad del suelo ha decrecido en el área, con una alta degradación del suelo.
- La degradación del suelo es más fuerte en zonas de laderas pronunciadas y en parcelas con un período muy largo de producción intensiva de hortalizas.

DEFINICION DE LOS INDICADORES

Bosquejo de los Impactos del Uso de la Tierra sobre las Características del Suelo en el Area de Investigación

El primer paso para la definición de los indicadores consistió en la identificación de las características del suelo, que son importantes para su continua calidad como recurso para la producción sostenible de productos agropecuarios y forestales, y que pueden estar afectadas por el uso actual de la tierra. En la Figura 1, se presentan en forma esquemática los *impactos potenciales* del uso de la tierra sobre estas características.

El punto de partida del esquema son las prácticas culturales en las condiciones agroclimáticas de la zona de investigación¹. El signo “+” significa que hay una relación positiva en el sentido de que el factor causa un incremento en el otro factor, por ejemplo un aumento de acidez (que, sin embargo, significa una disminución del pH). El signo “-” significa una disminución, por ejemplo de la capacidad de retención del agua.

De acuerdo con el bosquejo, las prácticas culturales pueden aumentar la acidez mediante la aplicación de fertilizantes ácidos y las pérdidas de cationes por lixiviación y erosión. El aumento de la acidez, por otro lado, aumenta la solubilidad de aluminio del suelo (considerando que los contenidos de aluminio de los suelos volcánicos son relativamente altos). El incremento de aluminio soluble, por su parte, causa un aumento de la acidez. La acidez del suelo reduce la disponibilidad de nutrimentos y la eficiencia de la fertilización, especialmente del fósforo.

La alta proporción de cultivos tubérculos en rotación (papa, cebolla, zanahoria, remolacha) y la costumbre de quemar los residuos producen una disminución del contenido de materia orgánica, lo que también tiene un impacto negativo sobre la disponibilidad de nutrimentos. Además, afecta la actividad de la micro y mesofauna y disminuye la capacidad de retención del agua. Esta disminución de la capacidad de retención de agua, conjuntamente con las prácticas culturales, causan erosión hídrica, la cual, a su vez conduce a una pérdida de suelo con pérdida de nutrimentos y materia orgánica. Asimismo, produce un cambio de la estructura

1 Cabe recalcar que el esquema se refiere a condiciones agroclimáticas determinadas. Las mismas prácticas culturales pueden tener efectos muy diferentes bajo otras condiciones.

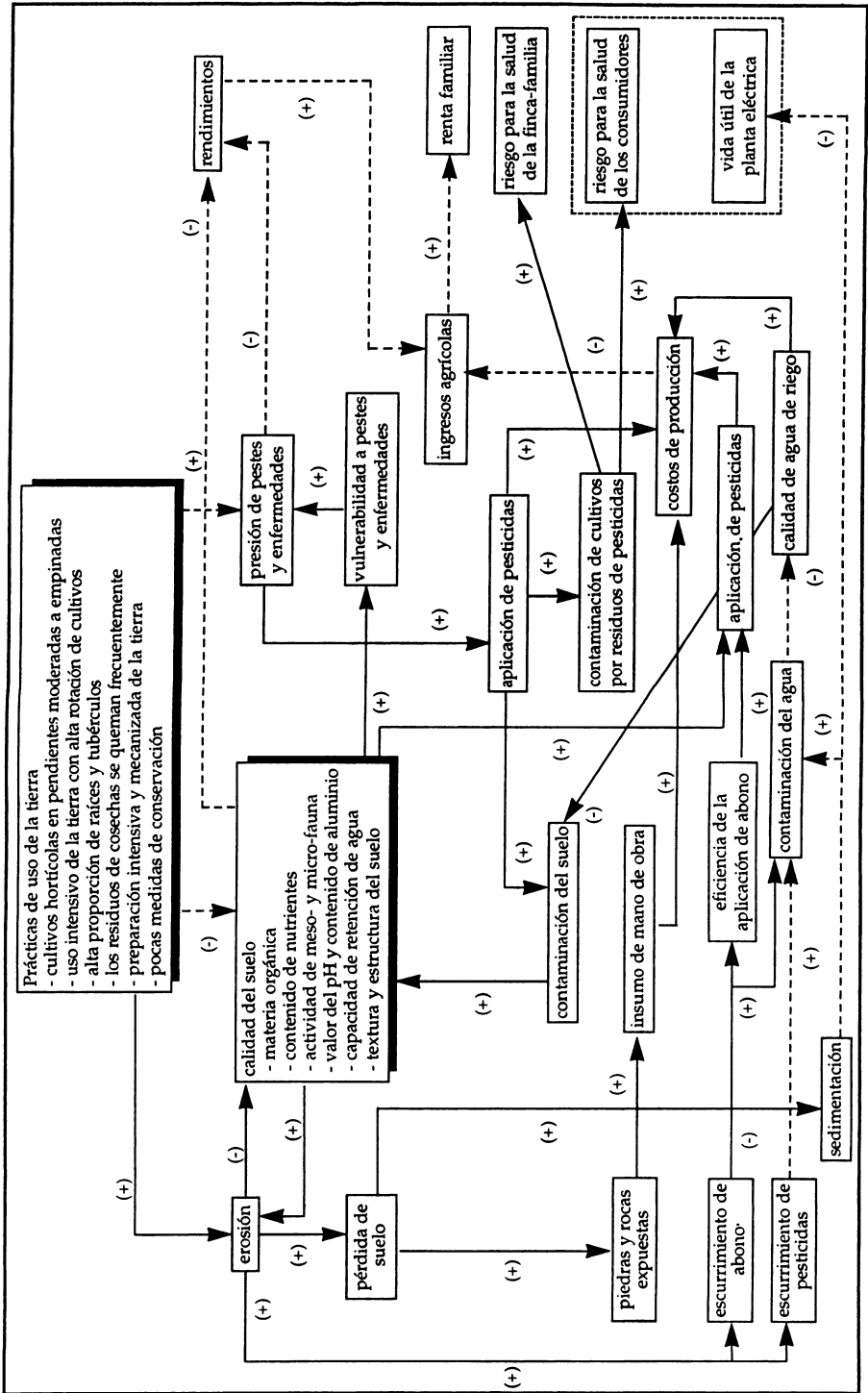


Figura 1. Presentación esquemática de los posibles impactos de las actuales prácticas de uso de la tierra sobre la sostenibilidad de la agricultura en la Cuenca del Río Reventado en Costa Rica.
Fuente: Elaborada por los autores.

por el lavado de las partículas finas del suelo y la ya mencionada disminución de la materia orgánica. El cambio de la estructura, por otro lado, afecta la capacidad de retención de agua, la disponibilidad de nutrimentos y la eficiencia de la fertilización.

Resulta que hay muchos factores que contribuyen a la disminución de la disponibilidad de nutrimentos, de la eficiencia de la fertilización y de la capacidad de retención de agua, que a su vez, muy probablemente, afectan los rendimientos. Además, la disminución de la materia orgánica puede tener impactos negativos adicionales, tales como un aumento de la vulnerabilidad del sistema para plagas y enfermedades del suelo.

Cabe recalcar que el bosquejo describe los impactos *potenciales* del uso de la tierra con base en el conocimiento de las características agroclimáticas de la zona y de las prácticas culturales. En el estudio empírico se deben elaborar indicadores con los cuales se puede comprobar si estos impactos están ocurriendo y, en el caso positivo, su importancia relativa.

Para tal fin, los indicadores deben relacionarse con los factores más importantes en este bosquejo, es decir, los factores de los cuales salen muchas flechas o a las cuales llegan muchas flechas, que tienen impactos sobre varios otros factores o que representan factores que están afectados por otros². Entre ellos se pueden mencionar la disponibilidad de nutrimentos, la materia orgánica, la erosión hídrica, el cambio de la estructura del suelo y la acidez. Para estos factores se definieron indicadores que se describen con más detalle en la sección siguiente.

Identificación de los Indicadores

En la sección anterior se analizaron las características importantes del suelo y los factores causantes de la degradación. En esta sección se definen los indicadores correspondientes y se hace un análisis más exhaustivo de los efectos esperados. Considerando que un indicador mide el cambio de una de estas características, debe tener alguna unidad de medición o de clasificación en el caso de indicadores cualitativos:

2 La flecha no dice nada sobre la intensidad del impacto y de antemano no hay criterios para elaborar hipótesis al respecto. En el caso contrario se podrían buscar también los factores en que el impacto es más fuerte.

indicadores para el uso de la tierra

Característica de suelo o factor que causa degradación		Indicador
Acidez	➔	pH y contenido de aluminio (meq/100 ml)
Materia orgánica	➔	Porcentaje de materia orgánica y porcentaje de carbono orgánico
Erosión hídrica	➔	Erosión visible (clasificación de 1 a 5 de acuerdo con el enfoque FAO) Grosor del horizonte A (cm)
Cambio de la estructura	➔	Índice estructural (clasificación de 1 a 7)
Disponibilidad de nutrientes	➔	Contenido de nutrientes (meq/100 ml, o ppm)

Acidez: pH y el contenido de aluminio

La acidez del suelo puede medirse a través del pH y del contenido de aluminio y es producto de la extracción de elementos que realiza la planta, especialmente cationes no ácidos, tales como calcio y magnesio, que se suman a las pérdidas de cationes por lixiviación y por erosión. Las plantas, al absorber cationes, liberan hidrógenos para mantener el equilibrio, lo que contribuye a disminuir el pH del suelo.

Un factor adicional que puede incrementar la acidez son los fertilizantes nitrogenados que contienen o forman amonio al hidrolizar, por ejemplo sulfato de amonio y urea, fertilizantes muy comunes en la producción hortícola.

La acidez es muy importante porque afecta la actividad de los microorganismos del suelo. Algunos microorganismos patógenos se reproducen mejor a pH ácido, con la desventaja de que pueden atacar el área radicular de la planta y producir daños severos. La acidez tiene un impacto indirecto al afectar la disponibilidad de algunos elementos. Si el pH es ácido, se favorece la disponibilidad de cobre, hierro y cinc y se disminuye la disponibilidad de molibdeno. En condiciones de fuerte acidez,

los contenidos de aluminio y de manganeso tienden a aumentar en la solución del suelo y pueden causar toxicidad a las plantas. El porcentaje de saturación de bases referido al calcio, potasio y magnesio intercambiables tiene una relación directa con el pH. Bajo condiciones de alta acidez, el calcio, magnesio y potasio disminuyen rápidamente en el suelo y se producen deficiencias de estos elementos en los cultivos. Por lo tanto, el valor del pH y el contenido de aluminio son indicadores de degradación en la calidad del suelo (Kass 1996).

Porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico

La materia orgánica está constituida por residuos provenientes de la descomposición de material vegetal y fauna del suelo, la cual, dependiendo de la temperatura, la humedad del suelo y del contenido de lignina de los residuos orgánicos, tarda de 6 a 12 meses para transformarse en humus, que es la parte activa de la materia orgánica, excepto los tejidos muy lignificados.

La materia orgánica del suelo puede evaluarse midiendo el porcentaje de materia orgánica en una unidad de suelo (%) (MO), o calculando el porcentaje de carbono orgánico (%) (CO). La materia orgánica influye en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo:

A) Propiedades químicas

- Suministra, por reciclaje, elementos como nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y micronutrientes como hierro (Fe), boro (B) y cinc (Zn).
- Vuelve inactivos los plaguicidas, en especial herbicidas. En un suelo degradado con bajos contenidos de materia orgánica, la infiltración de herbicidas hacia aguas profundas o el desplazamiento por escorrentía superficial aumenta la contaminación de depósitos de agua y de ríos.

B) Propiedades físicas

- Favorece el desarrollo de mesoporos y macroporos para la aireación del suelo, la retención de agua y la formación de agregados del suelo.

C) Propiedades biológicas

- Sirve de sustrato en microbiología de suelos para el desarrollo de microorganismos y mesofauna, cuyas actividades principales son la liberación o inmovilización de nutrimentos (Instituto de la Potasa y el Fósforo 1991).

Erosión visible y profundidad del horizonte A

La erosión es la pérdida del suelo por acción hídrica o eólica. En la zona de estudio el principal tipo es la erosión hídrica, que incluye erosión por salpique debido al impacto de las gotas de lluvia, erosión laminar y en surcos por escorrentía superficial, erosión en cárcavas por concentración del agua de escorrentía en áreas de microrrelieve depresional.

El método descrito por la FAO se refiere al daño visible causado a los suelos por la erosión acelerada. Para medir el grado de erosión se recurre a la observación en el campo de pedestales y raíces desnudas, a la existencia de canalículos, terracetas, surcos, cárcavas y deslizamientos, a la remoción de masas y a la acumulación de sedimentos en el pie de pendientes y vías de desagüe. De esta manera se implementaron cinco categorías de erosión (MAG, FAO y UNED 1994).

La pérdida del suelo se manifiesta también en una disminución del grosor del horizonte A, lo que puede afectar la productividad. Por ejemplo, en el caso de las parcelas de pochote que investiga el Proyecto MA-DELEÑA del CATIE, las especies que crecen en áreas de horizonte A con 10-15 cm de espesor, comparadas con plantas de la misma especie que crecen en suelos con horizonte A de 30 cm o más de grosor, tenían un índice diamétrico y una altura para los mismos años de registro en ambas parcelas consistentes y significativamente menores. Esta característica morfométrica del suelo bajo uso forestal evidentemente se puede extrapolar a áreas agrícolas. La importancia reside en que el grosor se combina con el contenido de materia orgánica, lo que permite mayor reciclaje de nutrimentos y una mejor regulación del pH (Núñez 1993).

Por lo tanto, se incorporó el grosor del horizonte A en el conjunto de indicadores. Sin embargo, se debe considerar que la erosión causada por la actividad agrícola no es la única que determina el grosor; dependiendo de los patrones de deposición de la ceniza en función de su tamaño, similar

al de la arena, y de la erosión que sufre por su ubicación dentro de la cuenca en la sección longitudinal noroeste, se produce mayor erosión en el límite inferior sur de la cuenca media que en el límite superior norte.

Índice estructural

Los procesos de degradación de tierras con más efectos directos en la producción de los cultivos incluyen la erosión hídrica, la compactación y el sellado de los suelos y sus combinaciones (Pla 1993). Este comportamiento puede demostrarse con base en un índice estructural propuesto por Pieri (1995), basado en el contenido de materia orgánica y las cantidades de limo y arcilla en el suelo.

$$Si = \text{SMO} (\%) / (\text{arcilla} + \text{limo})\% \times 100$$

Si = índice estructural

MO = % materia orgánica

El índice estructural se basa en la relación entre la materia orgánica y los contenidos de limo más arcilla en porcentaje por cien. El índice es importante para discriminar entre suelos degradados ($Si < 5$), entre suelos con alto riesgo de degradación física por encostrado o compactación ($Si=5-7$) o con moderado riesgo ($Si=7-9$) y de suelos estructuralmente estables cuando el índice $Si > 9$ % (Pieri 1995).

Contenido de nutrimentos

La fertilidad de los suelos es el resultado de la interacción de factores biológicos, químicos y físicos. Los *nutrimentos* constituyen solo una parte de una serie de factores que incluyen la relación entre cationes, la saturación de bases, acidez, actividad microbiana, sustancias húmicas que participan en el reciclaje de nutrimentos y en fuente de carbono orgánico para los microorganismos del suelo, además del *contenido de nutrimentos* que se evalúa con tablas de interpretación. Todos estos elementos, dependiendo de los contenidos, permiten discriminar un suelo fértil de otro de baja fertilidad. Este parámetro es el efecto de uno o más indicadores del suelo; por consiguiente, se puede definir como un indicador secundario derivado del análisis integral de otros indicadores (Nair, Kang y Kass 1996).

PROCEDIMIENTO DEL TRABAJO DE CAMPO

Una vez seleccionados los indicadores de acuerdo con las consideraciones meramente teóricas, se tenía que comprobar su valor en el campo. Para tal fin se había contemplado una serie de muestras de suelo bajo uso hortícola y su comparación con muestras del suelo no alterado. Dada la carencia de zonas naturales en el área de investigación, la identificación de valores de comparación, es decir, de testigos para las muestras, resultó muy difícil. Las únicas áreas dentro del bosque se encuentran en la parte alta de la cuenca, con suelos muy diferentes que no permiten ninguna comparación con las muestras del área de investigación.

Por lo tanto, se buscaron áreas que estaban con sistemas de pasto por muchos años, las cuales se usaron para las muestras testigo. Los autores están conscientes de que esto representa una severa limitación, dado que los suelos bajo pasto no pueden ser considerados como suelos sin alteración, porque han sufrido un proceso de deforestación y el cambio de uso. Sin embargo, la intervención del hombre es leve, comparándola con la que se da en la producción intensiva de hortalizas. Así, la interpretación debe efectuarse con mucha prudencia.

Durante los últimos 40 años, en el área de investigación se ha podido observar un cambio en el uso de la tierra en detrimento de los pastos y en favor del uso hortícola; por ello, se cultivan vegetales en las fincas con diferentes horizontes temporales. Se supone que las muestras de suelo bien seleccionadas (representativas respecto de los diferentes horizontes temporales) pueden dar una indicación con respecto a los cambios a mediano y largo plazos en las condiciones del suelo, como consecuencia de cambios en el uso de la tierra (Nair, Kang y Kass 1996).

Además, existen factores naturales que tienen un efecto sobre la calidad de los suelos, entre ellos la pendiente y la altitud (la distancia hacia el cráter del volcán que influye sobre la profundidad de la capa de ceniza) y los procesos naturales de erosión y degradación. Estos últimos son muy difíciles de separar de los procesos causados por la intervención antropógena. Con el fin de considerar el efecto de estos factores, se aplicó un sondeo representativo que cubría las diferentes altitudes y pendientes de la zona.

La determinación empírica del indicador "contenido de nutrimentos" resultó difícil de evaluar, pues la alta aplicación de fertilizantes por parte de los agricultores durante todo el año hace difícil la identificación de diferencias en función del grado de degradación.

indicadores para el uso de la tierra

Se tomaron 286 muestras de suelo para 139 diferentes perfiles. En parcelas con uso agrícola se tomaron 248 muestras y en parcelas testigo (terrenos en potrero durante al menos los últimos 20 años) se tomaron 38 muestras. Las profundidades de las muestras fueron de 0-20 cm, 20-40 cm y, en el caso de los testigos, de 40-60 cm. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de suelos del MAG. Los parámetros evaluados fueron pH, Al, Ca, Mg, K, P, Zn, Mn, Cu, Fe, N, S, materia orgánica (M.O.), textura del suelo y retención de humedad.

En el campo se evaluaron la textura, el color del suelo, el grosor del horizonte A, la densidad aparente y la erosión de acuerdo con la clasificación de la FAO (MAG, FAO y UNED 1994). Cada perfil se clasificó taxonómicamente, y se identificaron los posibles indicadores de suelo.

Con el fin de examinar posibles impactos de la calidad del suelo en los rendimientos, se midió la producción de los cultivos principales (cebolla y papa) para cada perfil muestreado en los ciclos comprendidos durante un año. La importancia de otros factores, tales como las prácticas culturales sobre los rendimientos, especialmente de la fertilización, hizo necesario el monitoreo de las aplicaciones en cada perfil muestreado.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS EMPIRICOS

Taxonomía de los Suelos de Acuerdo con los Perfiles Analizados

El primer paso del análisis empírico consistió en una clasificación de los suelos presentes en las fincas incluidas en la muestra de investigación. El método utilizado para la clasificación se basó en el documento del U. S. Soil Survey Staff (1990).

Los suelos de la región han sido influenciados por el aporte de ceniza volcánica y materiales volcánicos, como brechas, fragmentos de lava y piroclastos, dada la cercanía del área de estudio al cráter del volcán Irazú. Los suelos se clasificaron, en forma general, como *Dystrandepets*, con base en la taxonomía de suelos del USDA, editada en 1975 y vigente hasta 1990 (BEL Ingeniería S.A. 1987). Posteriormente, se han reclasificado dentro del undécimo orden de suelos, con base en el documento "Keys to Soil Taxonomy" del U.S. Soil Survey Staff (1990), como suelos del suborden *Ustands*, especialmente por el régimen de humedad ústico que predomina en la región (BEL Ingeniería S.A. 1987). Dentro del orden de los Andisoles, se tienen tres clasificaciones: *Thaptic Haplustands*, *Thaptic Ustivitrands* y *Dystric Haplustands*. Dentro del orden de los Entisoles, se encuentran los *Typic Ustorthents*. Por último, en el orden de los Inceptisoles, aparecen los *Ustandic Humitropepts* y los *Typic Dystropepts*. Se trató de determinar una secuencia de los órdenes en función de la meteorización y degradación de los suelos.

Existe una marcada secuencia de suelos clasificados como *Thaptic* y *Dystric Haplustands*, que predominan generalmente en la parte alta de la cuenca, con inclusiones de suelos clasificados como *Typic Usthortents*. Los *Usthortents* se presentan tanto en la parte alta y la parte media de la cuenca del río Reventado, como consecuencia de procesos erosivos en laderas escarpadas a muy escarpadas, donde el suelo de origen volcánico ha sido erosionado por escorrentía causada por eventos pluviométricos de alta intensidad, que dejan expuesto un subsuelo de textura franco arcillo-arenosa.

En el Anexo 2 se presenta el mapa de suelos del área de estudio. Las unidades cartográficas son las siguientes:

Asociación Varillal (Va): La unidad taxonómica incluye los *Thaptic* y *Dystric Haplustands*. Abarca un área de 1971.4 ha, que corresponde al 91.6% del área de estudio. Estos suelos están situados en terrazas moderadamente disectadas de relieve fuertemente ondulado con ámbitos variables en pendientes. El régimen de humedad del suelo es ústico. Son suelos profundos con horizontes A gruesos y con texturas francas en el suelo y franco-arenosas en el subsuelo. El uso actual incluye cultivos de papa y cebolla predominantemente. En los *Thaptic Haplustands*, el perfil modal no. 82 presenta un horizonte A con una profundidad de 0-45-60 cm, color negro, estructura granular fina y mediana y textura franco-arenosa. Tiene un horizonte transicional entre 45 y 65 cm de profundidad (AB), de color pardo muy oscuro, textura franca, estructura granular mediana y muy friable. El horizonte B se inicia a los 65 cm de profundidad, es de color pardo oscuro, franco con estructura moderada y friable. Este horizonte B a veces aparece a más de 120 cm de profundidad, lo cual hace que el horizonte AB, cuando existe, se alcance en nuestras observaciones a esa profundidad. El segundo perfil modal (no. 21), clasificado como *Dystric Haplustands*, tiene un horizonte A de 0-60 cm de profundidad, color pardo muy oscuro, franco-arenoso, de estructura granular mediana y friable en húmedo. El horizonte B se inicia después de 60 cm de profundidad, y es de color pardo oscuro, franco-arenoso y de estructura granular fina y mediana.

Consociación Sanatorio (Sa): Los suelos se clasificaron como *Thaptic Ustivitrands*. Abarca un área de 18.4 ha, que representan 0.9% del área total estudiada. Son de relieve ondulado a moderadamente colinado. El régimen de humedad es ústico; son suelos bien drenados, profundos, de texturas franco-arcillo-arenosas a francas y en algunos casos, franco-arenosas. Tienen buen desarrollo estructural y son friables en húmedo.

El perfil modal (no.8) tiene un horizonte A de 0-62 cm de grosor, color pardo oscuro, textura franco-arcillo-arenosa y estructura granular fina. Son friables en húmedo y muy porosos. El horizonte AB es de color pardo oscuro, textura franco-arcillo-arenosa y con estructura en bloques angulares medianos.

Consociación Banderillas (Ba): Los suelos de esa unidad se clasificaron como *Ustandic Humitropepts*. Abarca un área de 135.2 ha, que equivale a un 6.3% del área total. Son de relieve ondulado a moderadamente colinado. El régimen de humedad es ústico, son suelos profundos, bien drenados, de texturas francas en el suelo y franco-arcillosas en el subsuelo,

con un desarrollo estructural que va de granular fino a bloques subangulares medianos; son suelos muy friables. El perfil modal (no.79) tiene un grosor del horizonte A de 40 cm, color pardo muy oscuro, textura franca, estructura granular fina y abundante porosidad. El horizonte B va de 40-120 cm de profundidad, de color pardo oscuro, textura franco-arcillosa y estructura en bloques subangulares de tamaño mediano.

Consociación Laguna (La): Los suelos de esa unidad se clasificaron como *Typic Usthorents*; predominan en escarpes o laderas que van de simples a complejas, escarpadas a fuertemente escarpadas en pendiente. Abarca 13.1 ha, que equivalen a 0.6% del área total. Son suelos moderadamente profundos, que normalmente tienen gravilla abundante tanto en la superficie del suelo como en el perfil. Son de drenaje moderado. El régimen de humedad es ústico. Normalmente tienen un estrato gravilloso que se inicia entre 35 y 60 cm de profundidad. La textura predominante es franco-arenosa, aunque ocasionalmente hay horizontes en el subsuelo de textura-franco-arcillo arenosa. El perfil modal no. 16 se clasificó como *Typic Usthorents*, tiene un horizonte A de 26 cm de espesor, de color pardo grisáceo muy oscuro, textura franco-arenosa, estructura granular mediana y friable en húmedo. Luego sigue un horizonte C1 que va de 26-45 cm de profundidad y que tiene una mezcla de colores que incluye pardo grisáceo muy oscuro, pardo amarillento y pardo amarillento oscuro. Es de textura franco-arenosa y no tiene desarrollo estructural. Luego de 45 cm de profundidad se presenta un subhorizonte C2 constituido por un estrato de gravas y gravillas de forma subangular y de 2 a 5 cm de longitud, más de 35% por volumen mezclado con arena fina.

Consociación El Alto (AL): Son los suelos clasificados como *Typic Dystropepts*; abarcan 13.9 ha, que equivalen a 0.6% del área total. Se encuentran situados en áreas escarpadas de la cuenca del río Reventado, con pendientes de 50% o mayores. Son suelos bien drenados, con erosión laminar moderada a fuerte. El régimen de humedad es ústico, de texturas francas a franco-arenosas. Por la pendiente no se utilizan en agricultura y están cubiertos de pastos.

El perfil modal no.131 tiene un horizonte A de 20 cm de espesor, de color pardo muy oscuro, textura franca, estructura granular mediana y de consistencia friable en húmedo. El horizonte B va de 20 a más de 120 cm de profundidad. Tiene colores mezclados pardo amarillento y pardo amarillento oscuro. Textura franco-arenosa, estructura en bloques suban-

indicadores para el uso de la tierra

gulares medios y una consistencia friable en húmedo. Tiene revestimientos rojizos de hierro pequeños y nítidos en un 10%. Es un horizonte muy poroso.

En forma generalizada, en el área de estudio se puede definir que el grupo de los Andisoles son los suelos más jóvenes que presentan una menor degradación. Dentro de este grupo, se clasificaron los *Thaptic Haplustands*, *Thaptic Ustivitrands* y *Dystric Haplustands*. De los tres grupos de suelos, los *Dystric Haplustands* son los más degradados por presentar un empobrecimiento de las bases.

Le sigue el orden de los Entisoles, en donde la causa de la degradación del suelo se debe a que el suelo original se ha perdido por erosión, lo que hace que aflore el material subyacente (horizonte C).

Por último, de los suelos muestreados para esta investigación, los suelos del orden Inceptisol son los de mayor degradación. Los *Ustandic Humitropepts* presentan baja saturación de bases, menor del 50% por ciento, las cuales se han perdido por lixiviación, pero tienen alto contenido de materia orgánica. Esta última característica es la que los diferencia de los suelos *Typic Dystropepts*, que son el grupo de suelos con mayor degradación (U.S. Soil Survey Staff 1990).

Análisis de los Diferentes Indicadores

Acidez: pH y contenido de aluminio

El análisis de los datos empíricos mostró que en las fincas de uso agrícola se pudo observar un incremento de acidez y mayores valores de aluminio (en miliequivalentes por 100 ml) que en las parcelas testigo. El análisis de los resultados promedio de pH y el contenido de aluminio de las 286 muestras de suelo obtenidas en el campo se presentan en el Cuadro 1.

En el Cuadro 1 se observa que el promedio de pH para las fincas de uso agrícola es cuatro veces más ácido que el pH de las parcelas testigo para las profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm. Además, el contenido de aluminio extraíble en las parcelas agrícolas es el doble del contenido de las parcelas testigo para los primeros 20 cm de profundidad.

Cuadro 1. Valores promedio de pH y aluminio determinados en las muestras de suelos.

Variable	Parcelas agrícolas		Parcelas testigo	
	Promedio	Desv. est. *	Promedio	Desv. est.
pH1 (0-20 cm)	5.6	0.4	6.0	0.4
pH2 (20-40 cm)	5.7	0.4	6.2	0.5
Al 1 meq/100 ml (0-20 cm)	0.4	0.3	0.2	0.1
Al 2 meq/100 ml (20-40 cm)	0.3	0.2	0.2	0.1

Fuentes: Datos de la investigación y cálculos de los autores.

* Desviación estándar

Existe una correlación negativa entre la acidez extraíble y el valor de pH medido en agua. Esto es, a menor pH (mayor acidez) y mayor contenido de aluminio en el suelo, con predominio marcado en las parcelas de uso agrícola. También se encontró una buena correlación entre el aluminio y la altitud: a mayor altitud mayor contenido de aluminio. Una de las razones para explicar este comportamiento se relaciona con el material parental. Cuando la ceniza volcánica es más reciente, se incrementa la cantidad de óxidos de aluminio con diversos grados de hidratación y de polimerización, aunque se reconoce que el único estado de oxidación estable en solución acuosa es el AL^{+3} . Ese aluminio proviene de los aluminosilicatos y otros minerales primarios a través de la meteorización. Puede precipitar en las capas del suelo y ser trasladado por acción del agua en forma amorfa a las capas inferiores del suelo. Posteriormente, esas formas amorfas pierden agua y los óxidos cristalizan paulatinamente.

La cantidad de aluminio en el subsuelo es mayor que en las capas superiores. Simultáneamente, el pH en las capas del subsuelo es más ácido que en la superficie. Además, en áreas de relieve ondulado hay mayor contenido de aluminio en el subsuelo que en áreas de relieve escarpado, ya que el aluminio soluble se puede perder por procesos de erosión. Esta correlación negativa entre el contenido de aluminio y la erosión es muy evidente en las parcelas testigo, en donde a mayor erosión menor contenido de aluminio.

Tal como se ha mencionado anteriormente, un factor adicional que incrementa la acidez en el suelo son los fertilizantes nitrogenados que contienen o forman amonio al hidrolizar, por ejemplo: nitrato de amonio, sulfato de amonio y urea (Darusman *et al.* 1991). Para comprobar el efecto residual de los fertilizantes, se estableció un ensayo con dos de los fertilizantes más usados tradicionalmente en la zona de estudio (10-30-10 y 18-5-15-6-2), para dos fincas con 7 y 20 años de uso agrícola continuo y dos fincas que no han sido cultivadas en los últimos 25 años y se mantienen como potreros.

El ensayo consistió en dos tratamientos con cuatro repeticiones cada uno, para un total de 32 tratamientos. Las cuatro fincas se identificaron como Finca A (parcela con 7 años de uso agrícola), Finca B (parcela con 25 años de uso agrícola), Finca C (parcela con 20 años como potrero), Finca D (parcela con 25 años como potrero). El ensayo se montó utilizando recipientes plásticos, a los cuales se les agregó 1 kg de suelo de cada una de las fincas, más 10 gramos de los fertilizantes seleccionados.

Es decir, cuatro repeticiones con el suelo de la Finca A en donde se agregó a cada recipiente 10 gramos del fertilizante 10-30-10 y cuatro repeticiones con el mismo suelo, pero a los cuales se les agregó 10 gramos del fertilizante 18-5-15-6-2; lo mismo se hizo para el suelo de las tres fincas restantes. Los tratamientos se mantuvieron en incubación con el suelo a capacidad de campo durante 74 días. El pH se determinó mediante agua destilada con una relación suelo-agua de 1 a 2:5 y se hicieron dos mediciones, una a los 37 días de incubación y otra a los 74 días de incubación. El objetivo fue determinar si estos dos fertilizantes, que son de uso común en la zona de estudio, tienen efecto residual ácido.

Los resultados obtenidos se contrastaron con mediciones iniciales del pH del suelo sin haber aplicado fertilizantes, los cuales se realizaron en el Laboratorio de Suelos del MAG, y para los testigos, se utilizó el pH medido en el Laboratorio de Suelos del ITCR. Los resultados obtenidos para las fincas de uso agrícola no presentaron un patrón que indique efecto residual del fertilizante. Las razones que se asumen para justificar este patrón se deben a que estos suelos son encalados periódicamente y cualquier residuo de carbonato de calcio presente en el suelo puede haber neutralizado, eventualmente, la acidez residual del fertilizante.

Para las parcelas testigo en que los suelos no han sido encalados ni fertilizados en los últimos 20 años, se determinó el siguiente comporta-

miento: en la Finca C, el fertilizante 10-30-10 tuvo un efecto residual con un incremento de más o menos 6 veces en la cantidad de acidez en el suelo a los 37 días y se mantuvo igual a los 74 días, para un promedio de 0.6 unidades del pH más ácido.

Para el fertilizante 18-5-15-6-2, el efecto residual a los 37 días fue insignificante, con un descenso de 0.1 unidad del pH, pero a los 74 días mostró un incremento de 5.3 veces la cantidad de acidez con un descenso en el promedio del pH de 0.5 unidades.

En la Finca D, el fertilizante 10-30-10 tuvo un efecto residual con un incremento de 11.7 veces en la cantidad de acidez equivalente a un promedio de 1.17 unidades del pH a los 37 días. A los 74 días, el efecto residual correspondió a un incremento de 17 veces en la cantidad de acidez, lo que implicó un descenso del pH en promedio de 1.7 unidades. Para el fertilizante 18-5-15-6-2, hubo un incremento de 8 veces en la cantidad de acidez, lo que equivalió a un descenso del pH de 0.8 unidades a los 37 días, mientras que a los 74 días el suelo mostró un incremento de 13 veces en la cantidad de acidez, lo que equivalió a un descenso del pH de 1.3 unidades.

Con base en los resultados de campo y el ensayo realizado en el laboratorio, se considera que el pH es un indicador de degradación en la fertilidad del suelo, porque desciende desde valores iniciales de 5.8 y 6.4 en los suelos sin aplicación de fertilizante, hasta valores que se sitúan en ámbitos de pH de 4.5 a 5.1. En estos ámbitos solubiliza el aluminio intercambiable.

Algunos impactos directos en el cultivo, al darse un incremento de la acidez en los suelos por la presencia de aluminio soluble, son fuente de una mayor toxicidad que causa el aluminio en el sistema radicular de los cultivos susceptibles, lo que disminuye la capacidad de elongación de las raíces, porque se atrofia la división celular de los meristemas radiculares (Kass 1996; Salas 1996). Esto ocurre por algunos de los siguientes procesos:

- El aluminio del suelo se vuelve soluble, lo que incrementa posteriormente la acidez del suelo por hidrólisis de sus formas monoméricas.
- Se incrementa la acidez intercambiable, esto es, los iones hidrónimos son retenidos en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas (Kass 1996).

indicadores para el uso de la tierra

- Se afecta la disponibilidad de nutrimentos como el molibdeno y los procesos de nitrificación del nitrógeno.
- Adicionalmente, como estos suelos son de carga variable, al bajar el pH disminuye su capacidad de intercambio catiónico, afectando la capacidad de retener fertilizantes.
- Con estos grados de acidez, se puede también incrementar la solubilidad del manganeso, lo que puede causar problemas de toxicidad.
- La disponibilidad de fósforo se vuelve conflictiva, porque la fijación del fósforo se incrementa debido a la presencia de aluminio soluble que se da con el incremento de la acidez. Este proceso de fijación se agrava porque, además, la presencia de arcillas alofánicas en estos suelos volcánicos hace que se fijen grandes cantidades de fósforo (Alvarado 1982).
- Como estos suelos son del orden Andisol, se supone que tienen una alta capacidad de regular el pH (resistencia al cambio del pH); sin embargo, el efecto residual ácido del fertilizante supera esa capacidad reguladora. Por último, debido a esa misma característica, determinar los requerimientos de encalado en estos suelos es más complicado, por lo que no existe una regla simple para evaluar los requerimientos de cal en estos suelos; y la hidrólisis de carbonato de calcio (la enmienda de mayor uso) no necesariamente incrementará el pH de la disolución del suelo, aunque sí incrementará la capacidad de intercambio catiónico (Kass 1996; Espinoza 1996).
- Los principales impactos derivados de la toxicidad de aluminio soluble para las plantas son los siguientes:
- Decrece la actividad de microorganismos que descomponen materia orgánica en el suelo.
- Se presenta necrosis (muerte de tejidos) en el sistema radicular, lo que afecta la absorción de agua y nutrimentos.

Materia orgánica y carbono orgánico

En general, los niveles de materia orgánica observados en la zona son relativamente bajos, entre 0.2 y 0.4 en tierras con uso agrícola, en relación

con los valores esperados de un suelo volcánico entre 6 y 12% (Egawa 1980). En promedio hay un contenido de materia orgánica de más o menos 80% mayor en las parcelas testigo que en las parcelas agrícolas, para la profundidad de 0-20 cm. Para la profundidad de 20-40 cm, el contenido de materia orgánica en las parcelas testigo es 46% mayor que en las parcelas agrícolas. Esta disminución se debe a la poca movilidad del humus.

Los contenidos de carbono orgánico se mantienen en porcentajes similares a los de la materia orgánica. Los contenidos de nitrógeno se mantienen en un ámbito similar, tanto en las parcelas agrícolas como en las testigo, para ambas profundidades. No obstante, la relación carbono/nitrógeno (C/N) sí muestra una variación significativa. En suelos agrícolas la relación C/N es menor que en suelos con potrero, porque hay poco aporte de biomasa al suelo y en los tejidos vegetales que se incorporan al suelo predominan los polisacáridos y fracciones solubles en agua, lo que produce un carbono orgánico poco soluble en el suelo (Kass 1996).

Los datos obtenidos en el campo de materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno se presentan en el Cuadro 2.

El análisis estadístico con base en los coeficientes de correlación de Pearson indicó que los suelos estructuralmente más estables, con base en el índice de Pieri (Pieri 1995), son los que tienen mayor contenido de materia orgánica. La correlación indica que conforme el horizonte A se vuelve más delgado, el contenido de materia orgánica disminuye significativamente. Hay una correlación entre materia orgánica y el nitrógeno que indica que a menor contenido de materia orgánica menor contenido de nitrógeno en el subsuelo.

La pendiente, la erosión y los años de uso de la tierra influyen en el contenido de materia orgánica. Esto quiere decir que a mayor erosión y mayor pendiente en los suelos, hay menor contenido de materia orgánica. Además, conforme el horizonte A se vuelve más grueso, se incrementa el contenido de materia orgánica. Para todas estas relaciones las correlaciones son bastante significativas. También hay una correlación muy alta entre el contenido de materia orgánica en el suelo y el índice de estabilidad estructural: a mayor contenido de materia orgánica, mayor estabilidad estructural del suelo. Los suelos Andisoles son suelos que se desarrollan por acumulación de materiales; por ello, a veces se presentan mayores contenidos de materia orgánica en los horizontes del subsuelo que en la superficie (Pieri 1995).

Cuadro 2. Contenidos promedio de materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno en porcentaje, incluyendo la relación C/N para profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm.

Variable	Parcelas agrícolas		Parcelas testigo	
	Promedio	Desv. est.*	Promedio	Desv. est.
M.O. 1 (0-20 cm)	3.2	1.0	5.8	2.2
M.O. 2 (20-40 cm)	2.9	1.2	4.1	2.0
C.O. 1 (0-20 cm)	1.8	0.5	3.4	1.3
C.O. 2 (20-40 cm)	1.7	0.7	2.4	1.2
N 1 (0-20 cm)	0.4	0.2	0.4	0.2
N 2 (20-40 cm)	0.3	0.2	0.3	0.2
C/N 1 (0-20 cm)	6.4	3.4	9.4	6.4
C/N 2 (20-40 cm)	5.7	2.9	8.4	5.2

Fuentes: Datos de la investigación y cálculos de los autores.

* Desviación estándar

N, M.O., C.O. en %

P, Zn en ppm

Ca, Mg, K en meq/100 ml

La materia orgánica actúa como un regulador de acidez, impidiendo cambios abruptos en el suelo. Esto concuerda con la correlación negativa y significativa entre la materia orgánica y el contenido de aluminio. A mayor contenido de materia orgánica, menor contenido de aluminio extraíble y mayor amortiguamiento de la acidez en el suelo (Alvarado 1982; Espinoza 1996).

Algunos de los efectos del contenido de carbono orgánico en la degradación de los suelos son los siguientes:

1. Los residuos de los cultivos producen carbono orgánico en los suelos agrícolas, que se oxida rápidamente (en un 70%) en dióxido de carbono (CO_2), que se volatiliza y se pierde en la atmósfera (Kass 1996).
2. Si el carbono es soluble en agua, la mineralización es más rápida, hasta en un 90%.
3. Los polisacáridos también se oxidan en un 70 a 85% en un plazo de 6 a 12 meses.
4. El carbono orgánico proveniente de los residuos de los cultivos no tiene "anillos aromáticos" (los que producen estabilidad del compuesto) y la parte remanente es incorporada a la masa microbiana o materia orgánica.
5. Las ligninas y otros compuestos aromáticos son más resistentes a la descomposición. Sólo el 30% del carbono orgánico de la lignina es oxidado en término de un año y muy poco es incorporado a la masa microbiana (Kass 1996).
6. Los productos de degradación de lignina son una fuente de componentes aromáticos en las sustancias húmicas.
7. Las melaninas son otros productos de la humificación de los residuos orgánicos que se forman por la actividad de hongos y actinomicetes del suelo; son compuestos fenólicos de color oscuro muy resistentes a la degradación.
8. La estabilidad de carbonos aromáticos en las ligninas y melaninas sugiere que la "aromaticidad" es un factor de estabilidad en las sustancias húmicas. Esto se demostró en sistemas agrícolas y agroforestales bajo cultivo en Yucatán (México), comprobándose que el contenido de carbono orgánico en los polisacáridos disminuye. El cultivo y la adición de nutrimentos para las plantas resultan en un aumento relativo de oxidación en polisacáridos, lo que significa que su contenido es menor (Kass 1996).
9. La estabilidad de carbono orgánico, en suelos amazónicos de Terra Preta se correlaciona con una aromaticidad mayor que los suelos situados en los alrededores. Así, la aromaticidad de los suelos del trópico se debe a los fragmentos de lignina.

10. Con Carbono 14 (C^{14}) se ha obtenido mayor evidencia de estabilidad de las sustancias húmicas; la resistencia a la degradación de las sustancias húmicas contribuye a la estabilidad de la fracción orgánica en los suelos.
11. Algunos factores sugieren que la heterogeneidad de las sustancias húmicas contribuye a su estabilidad, por tener moléculas sin patrones definidos: las moléculas irregulares son menos atacadas por las enzimas y su composición variable resulta en el desarrollo de un ambiente rizosférico con una población heterogénea de microorganismos descomponedores de residuos.

Si ocurre un cambio en el uso de la tierra al pasar de bosque a cultivos, como es el caso en la cuenca del río Reventado, se producen los siguientes efectos: en suelos de bosque, la biomasa incorporada al suelo tiene gran proporción de tejidos lignificados, lo que produce carbono orgánico con anillos aromáticos. Este carbono orgánico es muy estable y el suelo tiene altos contenidos de carbono orgánico. Al cambiar el uso de la tierra a cultivos, la poca biomasa aportada tiene tejidos en los que predominan los polisacáridos y fracciones solubles en agua, lo cual produce carbono orgánico poco estable que rápidamente se degrada a dióxido de carbono. El resultado es que el suelo tiene bajos contenidos de carbono orgánico, lo que además está agravado por un manejo de residuos de cosecha, puesto que elimina casi toda la biomasa en vez de incorporarla al suelo (Kass 1996).

En consecuencia, disminuyen los estabilizadores de carbono aromático, y los residuos no lignificados de los cultivos se oxidan a CO_2 entre un 70 y 90% en un año. Al disminuir las sustancias húmicas estables en el suelo, se afectan los procesos de mineralización y reciclaje de N, P, S, Fe, B y Zn entre un 35 y 40%. Además, se afecta la actividad y heterogeneidad de la población de microorganismos. Adicionalmente, el tipo de cultivo y la adición de nutrimentos a las plantas producen un aumento relativo de la oxidación de carbono en los polisacáridos (Kass 1996; Espinoza 1996).

El cambio en el uso de la tierra y las técnicas de manejo de residuos que resultan en los bajos niveles de carbono orgánico influyen además en: i) contaminación por plaguicidas; ii) menor cantidad de carbono orgánico; iii) menor inactivación de herbicidas que contaminan aguas subterráneas por filtración y aguas de ríos, al ser transportados por esco-

rentía superficial. Además, los altos niveles de fósforo, en ámbitos de 200 a 600 ppm, pueden generar contaminación de aguas; y los altos niveles de potasio pueden interferir en la absorción de calcio y magnesio (degradación química).

Erosión visible y grosor del horizonte A

En la región no existen registros de mediciones acumuladas por períodos (años, décadas), pero sí existen registros de acontecimientos aislados de lluvias erosivas. Los resultados evaluados en estos eventos aislados para la zona norte de la ciudad de Cartago han permitido a los autores reportar índices de erosión muy altos, que en algunos casos superan las 100 toneladas por hectárea por año (Cortés y Oconitrillo 1987).

En el presente estudio no fue posible efectuar mediciones cuantitativas de la erosión en el campo porque el proceso de medición lleva muchos años. No obstante, se midió la erosión in situ con base en el sistema de la FAO.

En el estudio realizado en el campo, se comprobó que el tipo de erosión predominante es la erosión laminar en surcos (MAG, FAO y UNED 1994), la cual oscila de moderada a fuerte. Se estima que la erosión en cárcavas es incipiente, porque los agricultores preparan sus terrenos con bueyes o con maquinaria y modifican rápidamente la aparición de cárcavas, diseñando nuevos sistemas de curvas a nivel de las laderas, o disipando la energía del agua de lluvia en cauces de drenaje mediante el uso de "gavetas de disipación de energía hídrica" o con sacos rellenos de tierra colocados en el fondo de las gavetas para disipación de la energía hídrica. A pesar de que la erosión en cárcavas no es espectacular, la erosión laminar y en surcos presenta evidencia visual de ser grave. Un agente activo de erosión en surcos es la actividad de roedores como las taltuzas (*Orthogeomys sp*), que construyen cuevas en suelos de textura franca y franco-arenosa con el rompimiento de las acequias de ladera, además de que en áreas de pendientes se dan procesos de erosión en surcos entre las áreas de cultivo.

Otro indicador de erosión en la zona lo constituye el afloramiento del subsuelo de color pardo amarillento y textura franco-arcillo-arenosa, normalmente situado entre los 80 y 120 cm de profundidad. Este indicador se detectó en el campo, especialmente en áreas de laderas y ha sido

indicadores para el uso de la tierra

corroborado por los agricultores de la región. La metodología que se utilizó fue la del sistema Munsell de color, ya que los suelos volcánicos de la región son de color negro y el color pardo amarillento indica que la capa volcánica se ha perdido por erosión. En el Cuadro 3 se presentan los datos de los ámbitos de erosión observados en el campo y clasificados con base en el índice de la FAO (MAG, FAO y UNED 1994).

Las parcelas testigo, debido a la cobertura de pasto, tienen índices de erosión que son predominantemente de nula a leve (79%), y solo un 21% de las fincas tiene una erosión moderada. Normalmente, estas parcelas testigo que presentan una erosión moderada, son terrenos de pendientes escarpadas a fuertemente escarpadas. El 66 % de las fincas agrícolas presenta un índice de erosión de moderada a muy severa, el 29% un índice leve, y sólo un 5% erosión nula.

Cuadro 3. Ámbitos de erosión con base en el índice de la FAO para las parcelas testigo y las parcelas agrícolas³.

Número de parcelas testigo	Número de parcelas agrícolas	Ámbito de erosión de la FAO	Porcentaje
7		1	37
8		2	42
4		3	21
	6	1	5
	35	2	29
	58	3	49
	13	4	11
	8	5	6

Fuentes: Datos de la investigación e índices de clasificación de la FAO.

- 3 1 **Nula:** Sin síntomas de erosión.
- 2 **Ligera o leve** (erosión laminar y/o surcos ligera): Los suelos presentan pocos canaliculos de escasos centímetros de profundidad después de las lluvias; se considera que se ha perdido menos del 25% del horizonte A original.
- 3 **Moderada** (erosión laminar y/o surcos moderada): Presencia generalizada de canaliculos y surcos poco profundos; se considera que se ha perdido hasta un 50% del horizonte A original.
- 4 **Severa** (erosión laminar y/o surcos fuerte, o cárcavas incipientes): Presencia de abundantes surcos aun después del arado, de caliculus y surcos profundos. El suelo ha sido erosionado hasta en un 100% del horizonte A original.
- 5 **Muy severa** (cárcavas profundas y/o densas): Los suelos están prácticamente destruidos o son fuertemente truncados, con exposición del horizonte B. Se incluyen los deslizamientos y/o deposiciones masivas de suelos que se han desplazado desde su lugar de origen, por influencia de la lluvia y pendientes escarpadas.

A pesar de que muchas parcelas testigo tienen una pendiente promedio mayor en relación con las parcelas agrícolas, el índice de erosión en éstas es menor debido a la cobertura de pasto o bosque durante todo el año. En ello se diferencian de las fincas agrícolas, en donde el promedio de pendiente es menor, pero la erosión es mayor, debido al uso y a las prácticas agrícolas que en ellas se realizan (Cuadro 4).

Cuadro 4. Pendiente promedio y condición general de erosión de las parcelas testigo y de las parcelas agrícolas en función de los parámetros de la FAO.

Variable	Parcela agrícola		Parcela testigo	
Erosión estimada con el enfoque FAO	2.9	0.9	1.8	0.8
Porcentaje de pendiente	18.2	13.7	21.8	12.9

Fuentes: Datos de investigación e índices de clasificación de la FAO.

Se encontró una correlación significativa entre la pendiente y la erosión, es decir, a mayor pendiente, mayor erosión. Este efecto es más grave en las parcelas agrícolas que en el área de pastos, en donde no se encontró una correlación significativa.

Hay una alta correlación negativa entre la erosión y el grosor del horizonte A. A mayor erosión, menor grosor del horizonte A; y a mayor altitud, mayor profundidad del horizonte A. La altitud, la erosión y el grosor del horizonte A se pueden relacionar con el relieve. El relieve ondulado que predomina a mayor altitud ayuda a que los procesos de erosión no sean tan fuertes; además las capas de deposición de cenizas son más gruesas.

En el área hortícola, la erosión ha producido un decrecimiento de materia orgánica y de los contenidos de fósforo aplicado como fertilizante. Producto del descenso de la materia orgánica, se presenta una correlación entre la erosión y el índice de estabilidad estructural. Es decir, a menor erosión, mayor estabilidad estructural y mayores contenidos de materia orgánica en el suelo.

indicadores para el uso de la tierra

Indice estructural

De acuerdo con el índice estructural, los suelos se dividen en:

- Si < 5 = suelos degradados
- Si 5-7 = alta susceptibilidad de ser degradados
- Si 7-9 = moderadamente susceptibles a ser degradados
- Si > 9 = suelos estables

En las parcelas testigo se encontraron tres fincas con un índice Si = 5-7, una parcela con índice Si = 7-9, y 15 parcelas con índices Si > 9. Esto indica que la mayoría de las parcelas testigo tienen un suelo estructuralmente estable, con buenos contenidos de materia orgánica.

Cuadro 5. Índice estructural para las parcelas agrícolas y las parcelas testigo.

Parcela agrícola	Porcentaje	Parcela testigo	Porcentaje	Índice estructural
23	19			< 5
39	33	3	16	5-7
30	25	1	5	7-9
28	23	15	79	> 9

Fuentes: Datos de la investigación y Pieri 1995.

De acuerdo con este índice, un 19% de las fincas agrícolas tienen suelos degradados y altamente sensibles a la erosión. Un 33% de las fincas agrícolas tienen suelos altamente susceptibles con un alto riesgo de degradación física, debido a compactación y erosión. Un 25% son fincas con suelos ligeramente susceptibles de degradación física y solo un 23% de las fincas tienen suelos estructuralmente estables con adecuados contenidos de materia orgánica.

En el caso de las parcelas testigo, un 79% de los suelos son estables estructuralmente y poseen altos contenidos de materia orgánica. Una parcela es ligeramente susceptible de degradación física y tres parcelas

tienen suelos altamente susceptibles de degradación física. Para este último caso se trata de potreros que en determinado momento estuvieron en uso agrícola y además presentan bajos contenidos de materia orgánica.

En las parcelas agrícolas se encontró una correlación significativa del índice estructural con respecto al contenido de materia orgánica y el grosor del horizonte A, es decir, a mayor contenido de materia orgánica, mayor estabilidad estructural y mayor grosor del horizonte A.

Al evaluar la totalidad de las muestras, se encontró una correlación significativa entre el índice estructural y la erosión, es decir, a mayor índice estructural, menor erosión; otra, entre el índice estructural y el contenido de materia orgánica; y otra, entre el índice estructural y el contenido de nitrógeno: a mayor índice estructural, mayor contenido de materia orgánica y de nitrógeno.

Por lo tanto, en el área de investigación, una mayor erosión está acompañada por una estructura más débil del suelo y una disminución en el contenido de materia orgánica y de nitrógeno.

Contenido de nutrimentos

Tal como se ha mencionado anteriormente, la fuerte aplicación de fertilizantes por parte de los agricultores durante todo el año hace difícil la identificación de diferencias en función del grado de degradación. En el Cuadro 6 se presentan algunas diferencias que pueden observarse en el contenido de ciertos nutrimentos entre las parcelas agrícolas y las parcelas testigo.

Al analizar todas las relaciones promedio entre los cationes alcalinos y alcalinos térreos, no se encontró evidencia de desbalances entre ellos. Sin embargo, las parcelas testigo por su contenido de magnesio, se ubican en el umbral de respuesta a la aplicación del elemento. Por condiciones de fertilidad natural, los suelos tienen contenidos óptimos de calcio, potasio, nitrógeno y muy altos contenidos de fósforo (Bertsch 1987).

Otro elemento que presenta un comportamiento definido es el fósforo. Los suelos volcánicos tienen gran capacidad para fijar fósforo, hasta un 80% del fósforo aplicado en la fertilización. Sin embargo, en los suelos analizados en la región, debido a un exceso de fertilización con fósforo,

indicadores para el uso de la tierra

los índices de fósforo disponible son muy altos, lo cual, desde el punto de vista económico, no es adecuado, ya que se incurre en un gasto innecesario, que disminuye la utilidad neta del productor.

Cuadro 6. Contenidos promedio de algunos nutrimentos en las parcelas agrícolas y las parcelas testigo.

Elemento	Parcela agrícola	Parcela testigo
Nitrógeno 0-20 cm	0.4	0.4
Nitrógeno 20-40 cm	0.4	0.3
Potasio 0-20 cm	0.9	1.0
Potasio 20-40 cm	0.9	0.9
Fósforo 0-20 cm	133.1	38.6
Fósforo 20-40 cm	80.9	24.7
Magnesio 0-20 cm	1.9	1.0
Magnesio 20-40 cm	2.1	0.9
Calcio 0-20 cm	5.4	4.9
Calcio 20-40 cm	5.8	6.5
Rel. Mg/K 0-20 cm	3.1	3.4
Rel. Mg/K 20-40 cm	4.4	6.4
Rel. Ca/Mg 0-20 cm	3.4	2.0
Rel. Ca/Mg 20-40 cm	3.4	2.9
Rel. Ca+Mg/K 0-20 cm	10.2	10.7
Rel. Ca+Mg/K 20-40 cm	15.9	20.9

Fuentes: Datos de la investigación y cálculos de los autores.

Al analizar las correlaciones en el área total muestreada, se encontró que las correlaciones de magnesio y calcio son significativas con los años de uso por efecto de la fertilización utilizada por los productores, como el sulfato de magnesio, el K-Mg, el 18-5-15-6-2 y el calcio, por la adición de carbonato de calcio.

En relación con la pendiente, el aluminio, el fósforo y el potasio dan una correlación negativa o una disminución en el índice de correlación por consecuencia de la pérdida de suelo por erosión del horizonte A, que a su vez implica pérdida de nutrimentos. Esto se comprueba respecto al potasio con la correlación negativa que existe entre el elemento y la erosión. En términos generales, a menor erosión, mayor profundidad del horizonte A y mayor contenido de elementos en el suelo (RELACO III 1995).

También, a mayor profundidad del horizonte A, hay mayor contenido de materia orgánica del subsuelo. Debido a un mayor contenido de materia orgánica se da una correlación positiva entre el fósforo del subsuelo y la profundidad, es decir, a mayor profundidad del horizonte A, mayor contenido de fósforo en el subsuelo. Ello significa que a mayor contenido de materia orgánica en el subsuelo, menor capacidad de retención de fósforo por arcillas alofánicas, porque la materia orgánica bloquea los mecanismos de retención, produciendo mayor disponibilidad del fósforo. Pero, simultáneamente, la formación de complejos orgánico-minerales de arcilla-humus evita la cristalización del aluminio; éste queda soluble, lo que eventualmente incrementa la capacidad de retener fósforo en el suelo. Pero esta última etapa no es muy marcada en los suelos de la región porque los contenidos de aluminio extraíbles no son altos.

El pH del subsuelo es más alto que el pH del suelo superficial y hay una disponibilidad en los contenidos de magnesio y calcio, significativamente mayor en el subsuelo. Paralelamente, si se incrementa el contenido de aluminio extraíble en el suelo y subsuelo, la disponibilidad de calcio y magnesio en ambos casos es significativamente menor.

En la papa los rendimientos, en relación con la interacción nitrógeno-fósforo-potasio, son significativamente mayores que en función de los elementos aplicados en forma individual. Por tanto, existe una correlación del rendimiento con la interacción de los elementos nitrógeno, fósforo y potasio. También se encontró que a mayor contenido de calcio en el subsuelo, mayor rendimiento en la papa, pero conforme aumenta el contenido de aluminio, disminuye el rendimiento.

Igual que para la muestra total evaluada, en el cultivo de papa, a mayor número de años uso de la tierra, menor contenido de magnesio. Esto concuerda con la relación de que a mayor altitud, mayor disponibilidad de magnesio en el suelo, el cual es significativamente mayor. En la papa, a mayor pendiente, la erosión es significativamente mayor. Simultáneamente, se presenta menor profundidad del horizonte A, conforme aumenta la pendiente. El grosor del horizonte A se incrementa con la altitud debido a los depósitos de cenizas. Además, se determinó que a mayor años uso, hay menor materia orgánica en el suelo, ya que los tejidos de papa se oxidan rápidamente; además, hay extracción del cultivo y por efecto de las quemas desaparece la biomasa foliar. Son afectados también los contenidos de nitrógeno en el subsuelo, ligado al reciclaje de materia orgánica; es decir, a mayor número de años uso, menor contenido de nitrógeno en el subsuelo. Los contenidos de aluminio son menores conforme aumentan los años uso, consecuencia del encalado, ya que con el calcio la correlación es altamente significativa y también con el magnesio.

A mayor pendiente, mayor erosión y también menor profundidad del horizonte A y menor estabilidad estructural; los contenidos del nitrógeno son significativamente menores porque se pierden por erosión. Igual sucede con el fósforo y el potasio, pero no ocurre lo mismo con el calcio, debido a los encalados periódicos. En el subsuelo el contenido de aluminio es significativamente más alto, porque han sido suelos menos encalados y los contenidos de potasio son significativamente menores, al igual que el calcio y magnesio.

Existe una correlación entre la altitud y los años de uso de la tierra; a mayor altitud, menos años uso. Se trata de áreas de cambio en el uso de la tierra más reciente, porque la profundidad del horizonte A es significativamente mayor, y han sido áreas con mayor deposición de cenizas volcánicas, lo que quiere decir que los contenidos de materia orgánica se incrementan significativamente y también el contenido de nitrógeno en el subsuelo. Los contenidos de fósforo son significativamente mayores en el subsuelo, mientras que los contenidos de calcio y magnesio disminuyen en forma significativa.

Por efecto de la erosión, uno de los elementos que más se pierden del sistema es el fósforo, el cual se ve afectado significativamente con la erosión. A mayor profundidad del horizonte A, mayor índice estructural del subsuelo y mayor fósforo disponible, porque la materia orgánica ha bloqueado la retención, lo que aumenta la disponibilidad del fósforo. Como

es un elemento poco móvil, se aumenta su disponibilidad en el subsuelo. Pero para el calcio y el magnesio en el suelo y en el subsuelo, los contenidos disminuyen abruptamente, porque son de mayor movilidad y se pierden por lavado. Al aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo y en el subsuelo, disminuyen los contenidos de calcio y magnesio por la formación de complejos orgánico-minerales de arcilla-humus, que bloquean los sitios de retención de calcio y magnesio y, al quedar en la solución, se pierden más fácilmente por lavado y erosión.

En relación con la cebolla, conforme aumentan los años de cultivo se da una disminución significativa en el rendimiento. Hay menor rendimiento porque existe una pérdida significativa del horizonte A por erosión, que disminuye su grosor. También disminuye el contenido de materia orgánica en forma significativa, lo cual afecta la estabilidad estructural, y el nitrógeno ligado a la materia orgánica también disminuye. Además, si aumenta la pendiente, también se pierde el nitrógeno y el fósforo significativamente del sistema, por efecto de la erosión. Igual situación se da para el potasio.

Conforme aumenta la profundidad del horizonte A, también aumenta el contenido de materia orgánica y de nitrógeno, pero este aumento no se da a un nivel adecuado que permita un incremento significativo en los rendimientos. Quiere decir que se necesita un manejo que ayude a aumentar los contenidos de materia orgánica del suelo.

En las áreas sembradas con cebolla, al igual que con papa, el contenido de aluminio disminuye, consecuencia del encalado y de los contenidos de aluminio del subsuelo en función de la pendiente. Por tanto, los contenidos de aluminio son altos a mayor altitud, menos años uso y menor encalado.

El mecanismo de bloqueo del humus por las arcillas es igual en la cebolla que en la papa y por esta razón se aumenta el contenido de materia orgánica y el contenido de aluminio soluble en el subsuelo.

A mayor profundidad del horizonte A, el índice de estabilidad estructural tiende a aumentar en forma muy significativa. Se mantiene también la tendencia de que el índice es muy alto si el contenido de materia orgánica es alto. La estabilidad estructural disminuye altamente en el horizonte superficial, porque a mayor acidez menor es el contenido de calcio. Además, el calcio es un agente que promueve estabilidad estructural.

indicadores para el uso de la tierra

También en el subsuelo la estabilidad estructural es débilmente significativa, porque disminuyen los contenidos de calcio.

Al igual que para el análisis del área total, se da el caso de que a menor pH, mayor cantidad de aluminio extraíble. Con respecto al fósforo, si se incrementa la acidez, su disponibilidad disminuye significativamente. Si el contenido de materia orgánica es mayor, se aumenta la disponibilidad de fósforo y por último si el aluminio aumenta, el potasio disminuye. Además, al ser el potasio fácilmente desplazado a la solución del suelo, se pierde por lavado, lo que hace que el contenido sea significativamente menor en las determinaciones cuantitativas hechas en laboratorio.

En síntesis, cuanto mayor la pendiente y los procesos de erosión, más disminuye la profundidad del horizonte A: decrecen los contenidos de materia orgánica y se presentan suelos menos estables estructuralmente. Todo esto conduce a pérdidas de elementos en el sistema, como fósforo, nitrógeno y potasio, importantes en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, y a una disminución en la calidad de los suelos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este documento se analizan factores de sostenibilidad en un ecosistema agrícola que tiene un marco específico por la aplicación de tecnologías para el manejo del recurso suelo en parcelas agrícolas, comparadas con parcelas testigo sin uso agrícola, en la misma región. Está relacionado con agricultura hortícola: específicamente con los cultivos de la papa y la cebolla. El ecosistema agrícola y las parcelas testigo están ubicados en la cuenca media del río Reventado, en Tierra Blanca de Cartago, Costa Rica. El área de 2152 ha se localiza 13 km al norte de la ciudad de Cartago, en las faldas del volcán Irazú. Las parcelas agrícolas incluyeron cultivos de papa y cebolla. Las parcelas testigo incluyeron áreas de pastizales (kikuyo) y áreas de bosque secundario, especialmente jaúl.

Los parámetros que permiten discriminar sostenibilidad en relación con el suelo, aplicación de fertilizantes y productividad no se ajustan a los modelos tradicionales, matemáticos o estadísticos, diseñados a priori en gabinete, porque éstos carecen generalmente de comprobación experimental o de comprobación en el campo.

Los parámetros del suelo pueden correlacionarse con producción bruta y productividad. Pero los índices pueden ser fácilmente distorsionados por factores tan sencillos como la aplicación masiva de fertilizantes, el uso indiscriminado de plaguicidas y las técnicas de recolección de cosecha, lo que puede producir pérdida de producto y disminución de ingresos. A la postre, cualquiera de los factores anotados puede causar distorsión en los análisis.

Es evidente que los parámetros de producción agrícola, bruta y neta en una finca no se pueden desligar del manejo que el agricultor da a su finca, al trasiego de cosecha y a los canales de mercadeo. El recurso suelo, en esta condición, no es responsable del nivel de producción. Pero ¿cómo se puede comprobar? Por esta razón, el análisis tipológico que representa las características del suelo como un componente de producción, se invirtió: los indicadores del recurso suelo se redefinen como indicadores de degradación. La premisa es la siguiente: si un componente del ecosistema se degrada, se degradan algunos factores ligados al ecosistema y, en consecuencia, se alteran los parámetros de producción agrícola.

Otro asunto ligado al suelo, al manejo y a la degradación de algunos componentes biofísicos del ecosistema agrícola es la posibilidad de extrapolar información en subsectores tropicales. En forma general, es posible extrapolar metodologías generales de trabajo para evaluar indicadores de

indicadores para el uso de la tierra

sostenibilidad, o en su defecto, los indicadores de degradación del suelo. Pero esto significa que se deben evaluar los sistemas bióticos y abióticos de mayor incidencia en el recurso suelo, entre ellos:

- Las variables propias del suelo, el aporte de mejoradores al suelo y el efecto modificador que puedan producir.
- El tipo de cultivo y la tecnología utilizada para su explotación (rotación de cultivos, fórmulas fertilizantes, plaguicidas, insecticidas y herbicidas).
- Condiciones climáticas.
- Tecnologías de cosecha y manejo poscosecha.

Los indicadores de mayor peso, ligados al suelo, fueron los siguientes:

- Acidez del suelo.
- Materia orgánica.
- Erosión visible y profundidad del horizonte A.
- Índice estructural.
- Contenido de nutrimentos.

Acidez del suelo. El valor del pH y el contenido de aluminio, al comparar parcelas agrícolas y no agrícolas para lapsos de 15 a 20 o más años de uso definido, resultaron ser indicadores válidos para la degradación del suelo. Para dos profundidades, 0-20 cm y 20-40 cm, en las fincas agrícolas, el valor del pH tiende a ser cuatro veces más ácido, y el contenido de aluminio extraíble es el doble, comparado con parcelas testigo.

Materia orgánica. Este parámetro resultó ser valioso para estimar la degradación del recurso suelo e indirectamente como indicador de que la sostenibilidad del ecosistema agrícola se ha reducido en la región estudiada.

El contenido de materia orgánica para profundidades de 0-20 cm es de más o menos 80% mayor, mientras que de 20-40 cm es de 46% mayor

en parcelas testigo, comparado con parcelas de uso agrícola. El significado es mayor si se considera que los suelos estudiados son de origen volcánico, por lo que se da por un hecho que el suelo debe presentar altos contenidos de materia orgánica. Sin embargo, esto no es cierto si se cambia el uso de la tierra a explotaciones agrícolas intensivas; se destruye el reciclaje de nutrimentos ligados a la materia orgánica, entre ellos nitrógeno, fósforo y azufre, lo que obliga a invertir cantidades mayores de fertilizantes para sostener la producción agrícola.

Erosión visible y profundidad del horizonte A. El grosor del horizonte A ha sido afectado fuertemente en un gran sector de la cuenca, especialmente el sector sur, por procesos que incluyen erosión por salpique, dada la técnica de siembra de cultivos en terrenos desnudos de protección vegetativa. Otros tipos de erosión que coadyuvan son la erosión laminar y en surcos, causada por la escorrentía superficial. Un horizonte A grueso garantiza mayor contenido de materia orgánica por estrato y mejores condiciones para el reciclaje de nutrimentos, pero para las propiedades físicas del suelo es fundamental, ya que en esos suelos predominan texturas franco-arenosas, cuya capacidad de retención de agua es baja, lo cual, combinado con el régimen de humedad ústico de la región (el suelo se seca 90 días o más en la sección de control), representa baja disponibilidad de agua en el ecosistema. Un adecuado contenido de materia orgánica ligado a horizontes A gruesos mejoraría notablemente el almacenamiento y la disponibilidad de agua a más largo plazo.

Este último factor es notable en las parcelas agrícolas. Si se incrementa el contenido de arcilla y se pasa a texturas franco-arcillo-arenosas, se incrementa la producción en el cultivo de cebolla.

Índice estructural. El índice estructural, o estabilidad del suelo ante el embate de la lluvia (erosividad), es un factor ligado al contenido de materia orgánica del suelo y a su textura. Dado que predominan suelos franco-arenosos, con bajos contenidos de arcilla, nuevamente el contenido de materia orgánica juega un papel importante en la estabilidad del suelo o su resistencia a ser degradado. La consecuencia de ello es un mayor contenido de materia orgánica y mayor estabilidad.

Con base en el índice estructural obtenido, un 19% de las fincas tienen suelos degradados y altamente susceptibles de erosión. El 33% tienen suelos susceptibles con alto riesgo de degradación física, un 25% son fincas con suelos ligeramente susceptibles de degradación en propiedades

indicadores para el uso de la tierra

físicas, y sólo un 23% tienen suelos estructuralmente estables. Caso contrario son las parcelas testigo, pues el 79% de ellas tienen suelos estructuralmente estables y con altos contenidos de materia orgánica.

Contenido de nutrimentos. Hubo mucha variabilidad en la fertilidad del suelo como consecuencia de la excesiva fertilización; por tanto, no se pudieron evaluar las interacciones del contenido de nutrimentos. Estos indicadores evaluados son expresamente para los suelos de la cuenca media del río Reventado. No se pueden extrapolar los resultados a otra región, pero sí se puede aplicar la información, haciendo un estudio previo de los suelos de la zona que se desea analizar.

ANEXO 1

Clasificación de Algunos de los Perfiles de los Suelos Más Representativos del Area de Investigación

A) Perfil no. 82

Se clasificó como *Thaptic Haplustands*; desde el punto de vista fisiográfico, se encuentra en terrazas moderadamente disectadas. El perfil no. 82 se encuentra ubicado en un sitio que presenta una pendiente de un 6%; está bien drenado; tiene erosión laminar leve; y se cultiva con papa. Fue descrito el 14 de setiembre de 1994.

Descripción del perfil no. 82

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-45	Negro (10 YR 2/0), franco-arenoso; estructura granular fina, y mediana moderada; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros finos medianos, y gruesos abundantes; pocas raíces finas; límite gradual y plano
AB	45-65	Pardo muy oscuro (10 YR 2/2), franco; estructura granular mediana, y fina, moderada; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros medianos, finos y gruesos abundantes; límite claro y plano
B	65-120	Pardo oscuro (10 YR 2/3 en húmedo); franco, estructura granular fina, y mediana moderada; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros finos medianos, y gruesos abundantes

B) Perfil no. 08

Se clasificó como *Thaptic Ustivitrands*; se encuentra localizado en terrazas con pendientes del 9%; son suelos bien drenados en que no se evidencian problemas de erosión y que se cultivan con cebolla. En algunos sectores de la finca se encuentra gravilla fina de 2 a 3 cm de diámetro. Fue descrito el 9 de julio de 1994.

Descripción del perfil no. 08

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-62	Pardo oscuro (7.5 YR 2.5/2), franco-arcillo-arenoso; estructura granular fina y débil; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros finos medianos, y gruesos abundantes; raíces pequeñas y finas frecuentes; límite gradual y plano.
AB	62-120	Pardo oscuro (7.5 YR 3/2), Franco-arcillo-arenoso; estructura en bloques subangulares medianos moderada; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros finos medianos, y gruesos abundantes.

C) Perfil no. 21

Se clasificó como *Dystric Haplustands*; predomina en áreas de laderas simples, escarpadas. El perfil se ubica fisiográficamente en antiguas terrazas disectadas con pendientes del 10%; el material parental son cenizas volcánicas, un suelo bien drenado, con erosión laminar moderada. Se cultiva con cebolla. Fue descrito el 15 de junio de 1994.

Descripción del perfil no. 21

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-60	Pardo muy oscuro (10 YR 2/2 en húmedo), franco-arenoso; estructura granular mediana y fina; moderada en desarrollo; friable en húmedo no adhesivo ni plástico en mojado; poros finos, medianos y gruesos abundantes; pocas raíces finas; límite claro y plano.
B	60-120	Pardo oscuro (7,5 YR 3/2); franco-arenoso; estructura granular fina, y mediana moderada; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros finos medianos, y gruesos abundantes.

D) Perfil no. 16

Se clasificó como *Typic Usthorents*; predomina en áreas de laderas simples o complejas, escarpadas a fuertemente escarpadas. El perfil no. 16 se ubica fisiográficamente en escarpes de ladera con pendientes del 30%. Tiene presencia de gravilla abundante en la superficie y en el perfil, de 2 a 5 cm de longitud y de forma subangular. El drenaje es moderado y tiene una erosión laminar fuerte. Se cultiva con cebolla. Fue descrito el 10 de junio de 1994.

Descripción del perfil no. 16

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-26	Pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2 en húmedo), franco-arenoso; estructura granular media y fina, moderada en desarrollo; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros gruesos, medianos y finos frecuentes; límite claro y plano.
C1	26-45	Pardo grisáceo muy oscuro + pardo amarillento + pardo amarillento oscuro (10 YR 3/2 + 10 YR 5/7 + 10 YR 4/6); franco arenoso; ligeramente friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros finos abundantes; límite abrupto y plano.
C2	45+	Estrato de gravas y gravillas de más de 35% por volumen

E) Perfil no. 79

Se clasificó como *Ustandic Humitropepts*. El perfil no. 79 fisiográficamente se encuentra situado en terrazas disectadas en áreas de laderas simples con pendientes del 8%. Son suelos bien drenados con erosión laminar leve y material parental derivado de cenizas volcánicas. Se cultiva con papa. Fue descrito el 14 de setiembre de 1994.

Descripción del perfil no. 79

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-40	Pardo muy oscuro (10 YR 2/2); franco; estructura granular fina, y mediana, moderada; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros finos medianos, y gruesos abundantes; raíces finas abundantes; límite gradual y plano.
B	40-120	Pardo oscuro (10 YR 3/2, en húmedo); franco-arcilloso; estructura en bloques subangulares mediana; fuerte en desarrollo; friable en húmedo, ligeramente adhesivo y plástico en mojado; poros finos, y medianos y gruesos abundantes.

F) Perfil no. 131

Se clasificó como *Typic Dystropepts*. El perfil no. 131 fisiográficamente se encuentra situado en áreas escarpadas de la cuenca del río Reventado, con pendientes del 50%. Son suelos bien drenados, con erosión laminar moderada a fuerte y cultivados con pasto kikuyo. Fue descrito el 23 de noviembre de 1994.

Descripción del perfil no. 131

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0-20	Pardo muy oscuro (10 YR 2/2); franco; estructura granular mediana y fina, moderada; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; poros finos medianos, y gruesos abundantes; raíces finas medianas, y gruesas abundantes; límite abrupto y plano.
B	20-120	Pardo amarillento a pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4 + 10 YR 4/6, en húmedo); franco-arenoso; estructura en bloques subangulares, medios; moderada en desarrollo; friable en húmedo, no adhesivo ni plástico en mojado; con revestimientos rojizos de hierro pequeños y nitidos en un 10%; poros finos medianos, y gruesos abundantes a frecuentes; raíces finas, pocas.

Descripción de Cada Grupo de Suelos, Ordenados en Forma Descendente, de Menor a Mayor Grado de Degradación

A) *Thaptic Haplustands*

Orden Andisol, porque tiene una densidad aparente menor de 0.9 g/cm³ y fijan más del 80% de fosfatos.

Suborden *Ustands*. Andisoles con régimen de humedad ústico; el suelo permanece seco más de 90 días al año, consecutivos o no.

GranGrupo *Haplustands*. Andisoles con mínimo desarrollo genético.

Subgrupo *Thaptic Haplustands*. Son los *Haplustands* que tienen entre 25 y 100 cm de profundidad, una capa de 10 cm o más gruesa que tiene más de 3% de carbono orgánico y colores similares a un epipedón móllico a través de la profundidad indicada, presentándose debajo de un horizonte u horizontes de 10 cm o más de gruesos que tienen una claridad de color, una unidad o más alta que la capa subyacente.

Familia Medial, isotérmica.

B) *Thaptic Ustivitrands*

Orden Andisol. Tienen propiedades ándicas en los primeros 35 cm de profundidad, que incluyen densidad aparente menor de 0.9 g/cm³ y alta capacidad de fijar fosfatos.

Suborden *Vitrands*. Son los andisoles que tienen una capacidad de retención de agua menor del 15% a 1500 k Pa (kilo pascal) en muestras secas al aire en los primeros 35 cm de profundidad.

GranGrupo *Ustivitrands*. Régimen de humedad ústico.

Subgrupo *Thaptic Ustivitrands*. Son *ustivitrands* que tienen entre 25 y 100 cm de profundidad, una capa de 10 cm o de mayor grosor, con más de 3% de carbono orgánico; color en sistema Munsell similar a un epipedón móllico.

Familia Medial, isotérmica.

C) *Dystric Haplustands*

Orden Andisol, porque tienen una densidad menor de $0,9 \text{ g/cm}^3$ y fijan más del 80% de fosfatos.

Suborden *Ustands*. Andisoles con régimen de humedad ústico. El suelo permanece seco más de 90 días al año, consecutivos o no.

GranGrupo *Haplustands*. Andisoles con mínimo desarrollo.

Subgrupo *Dystric Haplustands*. Son los *Haplustands* que tienen bases extraíbles más aluminio extraíble en KCl 1N menor de 15 cmol (+) Kg-1 en al menos 60 cm continuos de los primeros 75 cm de profundidad.

Familia Medial, isotérmica; medial, porque no se puede dispersar cuando se determina textura; isotérmica, porque la temperatura promedio es menor de 22°C y mayor de 15°C .

D) *Typic Ustorthents*

Orden Entisol, porque no existe horizonte diagnóstico.

Suborden *Orthents*. Otros entisoles.

Gran Grupo *Ustorthents*. Régimen de humedad ústico; el suelo permanece seco más de 90 días al año consecutivos o no.

Subgrupo *Typic Ustorthents*, otros *Ustorthents*. Es lo más típico del grupo.

Familia Francosafina, isotérmica. Francosafina, porque tiene más de 15% de arena y entre 18 y 34% de arcilla.

E) *Ustandic Humitropepts*

Orden Inceptisol. Tiene un horizonte diagnóstico cámbico.

Suborden *Tropepts*. Son inceptisoles que tienen un régimen isoméxico o más caliente.

GranGrupo Humitropepts. Son *tropepts* que tienen una saturación de bases menor de 50% extraída con acetato de amonio en algún horizonte entre 25 y 100 cm de profundidad y tienen más de 12 kg de carbono orgánico proveniente de residuos vegetales por metro cuadrado, hasta una profundidad de 100 cm.

Subgrupo Ustandic Humitropepts, que tiene influencia de ceniza volcánica y régimen de humedad ústico.

Familia Franca gruesa, isotérmica.

F) *Typic Dystropepts*

Orden Inceptisol. Tiene un horizonte diagnóstico cámbico.

Suborden Tropepts. Régimen isomésico o más caliente.

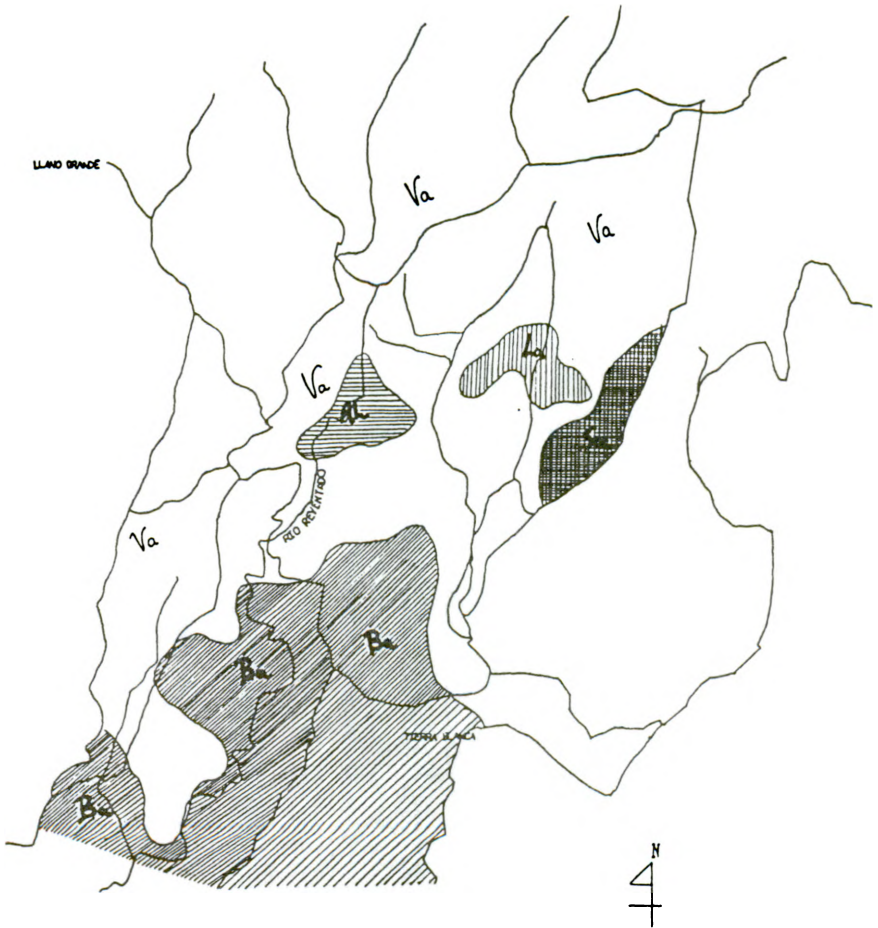
Gran Grupo Dystropepts, porque la saturación de bases extraída con acetato de amonio es menor del 50%.

Subgrupo Typic Dystropepts, otros Dystropepts. Lo más común del grupo.

Familia Franca fina / franca gruesa, isotérmica.

ANEXO 2

Mapa Base de Suelos de Tierra Blanca y Llano Grande de Cartago, Costa Rica



Proyecto de Indicadores. Unidad de Información Geográfica CCT.
San José, Costa Rica.
Fecha: Enero 1996.
Escala: 1:10.000

Leyenda Fisiográfica para la Cuenca Media del Río Reventado en Tierra Blanca y Llano Grande, Cartago, Costa Rica.

GRAN PAISAJE	PAISAJE	UNIDAD DE MAPEO	SIMBOLO CARTOGRAFICO	UNIDAD TAXONOMICA	AREA (ha)	PORCENTAJE (%)
CUENCA MEDIA DEL RIO REVENTADO	Terrazas moderadamente disectadas	Asociación Varillal	Va	<i>Thaptic Haplustands</i> <i>Dystric Haplustands</i>	1 971.4	91.60
		Consociación Sanatorio	Sa	<i>Thaptic Ustivoitrands</i>	18.4	0.90
	Escarpes de ladera	Consociación Banderillas	Ba	<i>Ustandic Humitropepts</i>	135.2	6.30
	Escarpes del cauce, río Reventado	Consociación La Laguna	La	<i>Typic Ustorthents</i>	13.1	0.60
		Consociación El Alto	AL	<i>Typic Dystropepts</i>	13.9	0.60
					2 152.0	100

BIBLIOGRAFIA

- Adriaanse, A. 1993. Environmental policy performance indicators. A study on the development of indicators for environmental policy in the Netherlands. Sdu Uitgeverij Koninginnegracht. The Netherlands.
- Alvarado, A. 1982. Phosphate retention in Andepts from Guatemala and Costa Rica, as related to other soil properties. Ph. D. Tesis. North Carolina, EE.UU., North Carolina State University. 82 p.
- Babel, U. 1975. Micromorphology of soil organic matter. In Soil components, organic components. Ed. por J.E. Gieseking. Berlín, Alemania, Springer-Verlag. p. 369-473.
- BEL Ingeniería S. A. 1987. Estudio de prefactibilidad para el riego de pequeñas áreas de la zona norte de Cartago y diseño de un plan piloto. Informe final. San José, C. R., BID/MIDEPLAN/SENARA. 100 p.
- Bertsch, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Editorial Universitaria. 13 p.
- Blakemore, L.; Searle, P.; Daly, B. 1987. Methods for chemical analysis of soils. Scientific Report. New Zealand, Soil Bureau. 35 p.
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. San José, C.R., IICA. 630 p. (Serie no. 60).
- Broadbent, F.E.; Jackman, R.H.; McNicoll, J. 1964. Mineralization of carbon and nitrogen in some New Zealand allophanic soils. Soil Science 98 (2):118-128.
- CNDTA (Comisión Nacional de División Territorial Administrativa de Costa Rica). 1985. División territorial administrativa de la República de Costa Rica. In La Gaceta no. 23, año CVII, Alcance no. 3. San José, Imprenta Nacional. p. 49-51.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica); FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación); UNED (Universidad Nacional de Educación a Distancia). 1994. Manual de manejo y conservación de suelos y aguas. 2 ed. Ed. por D. Cubero F. San José, EUNED. 278 p.

indicadores para el uso de la tierra

- Cortés, V.; Oconitrillo, G. 1987. Erosión de suelos hortícolas en el área de Cot y Tierra Blanca de Cartago. Tesis. San José, C.R., Universidad de Costa Rica, Departamento de Geografía. 158 p.
- Darusman, L.; Whitney, D.; Jamssen, K. ; Long, J. 1991. Soil properties after twenty years of fertilization with different nitrogen sources. *Soil Science Society of America Journal* 55:1097-1100.
- Diaz-Romeu, R.; Balerdi, F.; Fassbender, H.W. 1970. Contenido de materia orgánica y nitrógeno en suelos de América Central. *Turrialba* 20 (2):185-192.
- Egawa, T. 1980. Propiedades de los suelos derivados de ceniza volcánica. In *Suelos derivados de ceniza volcánica en Japón*. Ed. por Y. Ishizuka y C.A. Black. México, D.F., Méx., Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. p. 14-67.
- Espinoza, J. 1996. Relación entre la fertilización mineral, la materia orgánica y los microorganismos del suelo. In *Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales*. (10. 1966, San José, C. R.). [Memoria]. San José, C. R., EUNED-EUNA. p. 119-121.
- Goodland, D.; Redcliff, M. 1991. *Environment and development in Latin America. The politics of sustainability*. Manchester, Reino Unido, University Press. p. 3.
- Holdridge, L. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. Trad. por Humberto Jiménez Saa. San José, C.R., IICA. p. 8-9.
- Instituto de la Potasa y el Fósforo. 1991. El rol de la investigación de fertilidad de suelos en el desarrollo de sistemas sostenibles de producción de alimentos. Quito, Ec., *Informaciones Agronómicas*. p. 1-12.
- Jacob, A.; Vex Kull, H. 1973. *Fertilización, nutrición y abonado de los cultivos tropicales y subtropicales*. 4 ed. Traducido por L. López Martínez de Alva. México D.F., Méx., Ed. Euroamericanas. p. 548-551.
- Kass, D.C.L. 1996. *Fertilidad de suelos*. San José, C.R., EUNED. p. 90-109.
- Krebs, J.E. 1974. Chemical characteristics of the surface soil of three forests in San Carlos, Costa Rica. *Turrialba* 24(4):382-386.

- MacCarthy, P.; Bloom, P.R.; Clapps, C.E.; Malcom, R.L. 1990. Humic substances in soil and crop sciences: an overview. In Humic substances in soil and crop sciences: selected readings. Ed. por P. MacCarthy, C.E. Clapps, R.L. Malcom y P.R. Bloom. Madison, Va., EE.UU., American Society of Agronomy. p. 261-271.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica). 1980. Metodología para análisis de suelos, plantas y aguas. In Boletín Técnico no. 68. San José, MAG, Dirección de Investigaciones Agrícolas. 15 p.
- Melo Abreu, H.M. 1991. La conservación de suelos en Tierra Blanca, Cartago, Costa Rica: niveles de adopción y alternativas para incrementarlo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. p. 1-32.
- Nair, P.K.R.; Kang, B.T.; Kass, D.C.L. 1996. Agroforestry systems. In Agroforestry systems in the tropics. Ed. por P.K.R. Nair. Dordrecht, Holanda, Kluwer Academic Press, ICRAF. p. 39-52.
- Núñez, J. 1993. Estudio de suelos-Proyecto MADELEÑA-3. Turrialba, C. R., CATIE. 56 p. Mimeo.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 1977. Guía para la descripción de perfiles. Roma, Italia, FAO. p. 9-11.
- Pla, I. 1993. Erosión en suelos de ladera del trópico andino y centroamericano. In Manejo integrado de recursos naturales en ecosistemas tropicales para una agricultura sostenible. Santafé de Bogotá, Col., ICA.
- Pieri, C. 1995. Long-term soil management experiments in semi-arid Francophone Africa. In Soil management. Experimental basis for sustainability and environmental quality. Ed por R. Lal y B.A. Stewart. Boca Ratón, Fl., EE.UU., Lewis Publishers/CRC. p. 225-266.
- RELACO III. 1995. Erosion control of sloping land with conservation tillage erosion. Rattan Lal, Ohio, EE.UU., Ohio State University. p. 9.

indicadores para el uso de la tierra

Salas, R. 1996. El aluminio en la relación suelo-planta. In Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. (10., 1966, San José, C. R.). [Memoria]. Ed. por F. Bertsch, W. Badilla y E. Bornemiza. San José, C. R., EUNED, EUNA. v. 3, p. 109-111.

U.S. Soil Survey Staff. 1990. Keys to soil taxonomy. 4 ed. Blacksburg, Va., EE.UU., SMSS. p. 129-155. Technical monograph no. 6.

Esta edición se terminó de imprimir
en la Imprenta del IICA
en Coronado, San José, Costa Rica,
en el mes de junio de 1998,
con un tiraje de 500 ejemplares.

Sep-13/99

SERIE DOCUMENTOS DE DISCUSION
SOBRE AGRICULTURA SOSTENIBLE
Y RECURSOS NATURALES

A partir de 1990, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) y la Cooperación Alemana para el Desarrollo han trabajado en conjunto para apoyar a los países de América Latina y el Caribe en el área de agricultura, recursos naturales y desarrollo sostenible.

Desde entonces, el Proyecto IICA-GTZ ha contribuido al fortalecimiento de la capacidad institucional del IICA para satisfacer las demandas de los países miembros en esa área, para lo cual ha enfatizado el desarrollo de:

- Un marco conceptual y metodológico sobre desarrollo sostenible para el IICA.
- Un programa de capacitación para el IICA y sus contrapartes nacionales.
- Una estrategia para generar experiencia práctica (ventanas de sostenibilidad).
- Un sistema de documentación e información.
- Un marco conceptual y metodológico para indicadores de sostenibilidad.

Aunque ya se cuenta con publicaciones sobre algunas de las experiencias pasadas, el Proyecto IICA-GTZ se propone ahora hacer una contribución especial a través de esta Serie, para promover los resultados de su trabajo y estimular una mayor discusión en torno a temas que aún requieren análisis y elaboración conceptual.

El IICA y la Cooperación Alemana para el Desarrollo han acordado ampliar sus actividades en el contexto de la Agenda 21. Como parte de este compromiso, se espera que esta serie de publicaciones genere en la región un mayor interés y una comprensión más profunda sobre los principios de la sostenibilidad.