



**IV TALLER INTERNACIONAL DE SISTEMAS  
AGROPASTORILES PARA SUELOS ACIDOS  
DE LAS SABANAS**

**25-26 de Septiembre, 1995. Santa Cruz de la Sierra - Bolivia**

## INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD: PARAMETROS EDAFOCLIMATICOS Y DIAGNOSTICO DEL PERFIL CULTURAL

E. Amezcuita, D. Friesen, J.I. Sanz, CIAT, IFDC & CIAT

### INTRODUCCION

A medida que la población mundial se incrementa, el recurso básico suelo es sometido a una presión creciente para suplir las ascendentes demandas por alimento, combustibles y fibra. Gran parte de la presión, se esta sucediendo en los países en desarrollo del trópico y subtropico, donde los suelos en general estan menos dotados de nutrientes y donde ocurren valores extremos de temperatura y precipitación que pueden acelerar los procesos de degradación del suelo a una escala mayor de la que usualmente sucede en la zona templada. Los sistemas de producción agrícola deben por lo tanto adaptarse a las condiciones edafoclimáticas de estos ecosistemas para alcanzar los niveles de producción demandados, sin causar a largo plazo problemas de degradación del recurso básico sobre el cual depende la producción.

La sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola depende del mantenimiento o mejoramiento del recurso básico suelo a niveles físico, químico y biológico. El desarrollo y evaluación de sistemas alternativos de producción, implica por lo tanto que la productividad no puede estudiarse a corto sino a largo plazo; ello también requiere, a largo plazo, la cuantificación del impacto del sistema y de las prácticas de manejo del suelo en las propiedades y procesos importantes en la productividad agronómica y en la calidad del ambiente (Lal, 1994). La sostenibilidad de un sistema de producción debe evaluarse dentro del concepto de un tipo de tierra y ecosistema específico, en un período de tiempo definido y dentro de las limitantes físicas, económicas y sociales de la región (Dumanski, 1993). Un sistema que es sostenible bajo determinadas condiciones edafoclimáticas y socioeconómicas, no necesariamente lo es cuando las condiciones son diferentes.

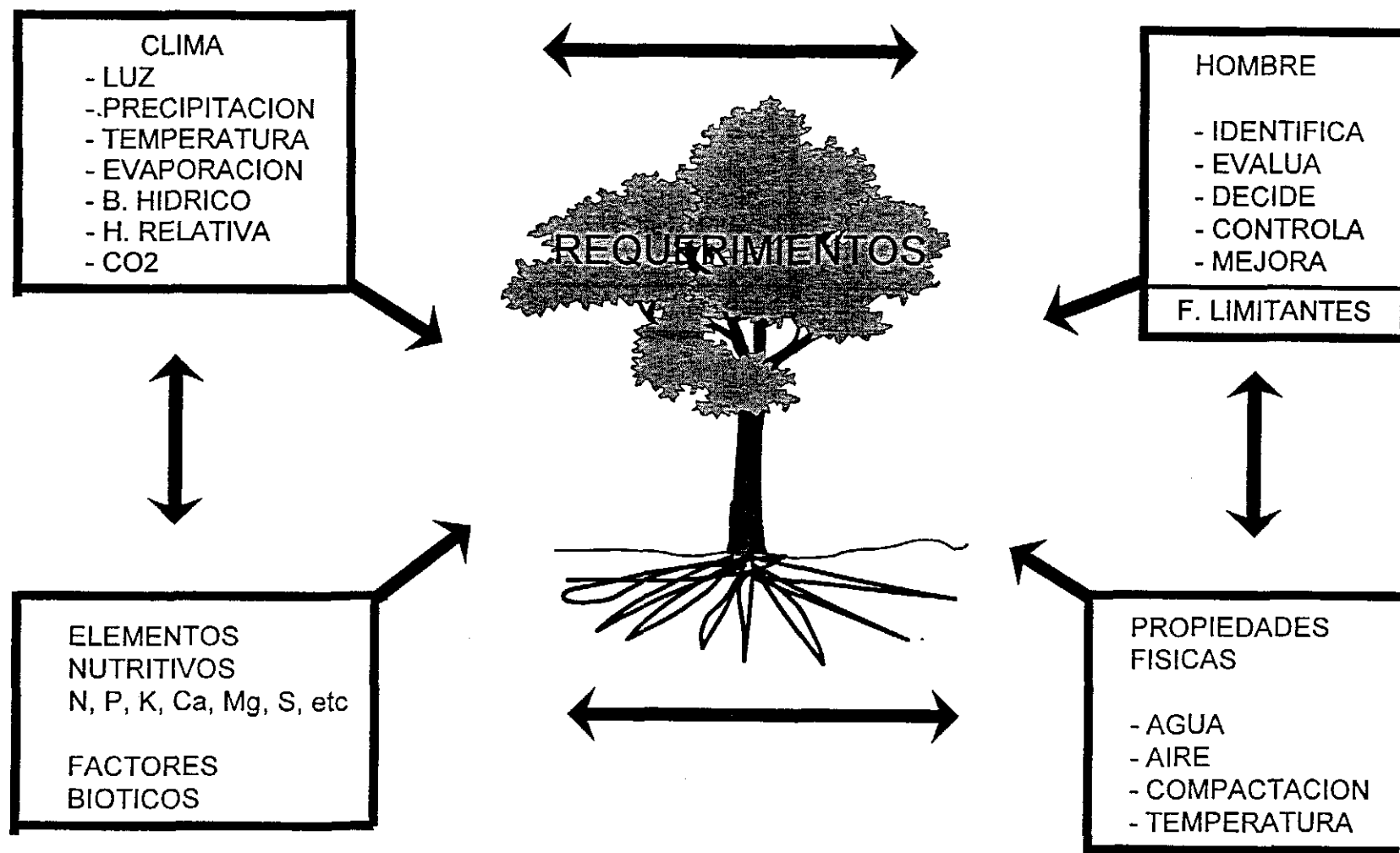
El propósito de este artículo es presentar una discusión de parámetros edafoclimáticos relacionados con sostenibilidad y discutir cuáles podrían funcionar como indicadores apropiados de la salud del suelo en sistemas agropastoriles en varios estados y edades de desarrollo.

### A. RELACIONES EDAFOCLIMATICAS Y PRODUCCION AGRICOLA

La producción y productividad agrícola dependen del comportamiento, intensidad, equilibrio, interacciones e interdependencia entre los factores: clima-suelo-planta-hombre (Figura 1). Corresponde al hombre identificar, definir y cuantificar las variables de clima y suelo para decidir la clase de cultivo que pueden desarrollarse exitosamente dentro de determinada zona agroecológica y conseguir mediante acciones de manejo el mejor equilibrio dinámico entre estos factores, con el fin de obtener el máximo rendimiento para el mejor aprovechamiento del medio (Amézquita, 1989).

Las prácticas del cultivo deben enfocarse de tal manera que logre maximizarse la fotosíntesis en un sitio y suelo dados. Esto se consigue si logran optimizarse los factores que controla la fotosíntesis: luz, temperatura, agua, nutrientes, aire y soporte mecánico. Bajo agricultura de secano es imposible controlar la intensidad de la luz y la temperatura del medio, pero los factores provenientes

Fig. 1 FACTORES DE PRODUCCION AGROPECUARIA



del suelo: agua, aire, nutrientes y soporte mecánico son susceptibles de manejo y de mejoramiento, con el fin de optimizarlos sosteniblemente.

### **A.1. IMPORTANCIA DE LOS PARAMETROS CLIMATOLÓGICOS PARA EL USO Y SOSTENIBILIDAD DE SUELOS.**

Bajo condiciones de campo, el agua que usan las plantas se origina en las precipitaciones. En la figura 2, se indican las características generales de las precipitaciones junto con sus implicaciones en el manejo adecuado de los suelos y en la aprovechabilidad de las aguas de lluvias. Por ejemplo, el parámetro la cantidad conduce a definir cuantitativamente el balance hídrico de acuerdo con los requerimientos hídricos de las plantas; el de intensidad al cálculo de la energía cinética de la lluvia que tiene que ver con erosión y conservación de suelos; la duración en combinación con cantidad e intensidad al control de inundaciones y con prácticas adecuadas de labranza al mejoramiento del agua aprovechable en el perfil del suelo; la frecuencia de los anteriores atributos de las lluvias, al estudio de periodos de retorno con fines de diseño conservacionistas, la recolección de aguas de escorrentía y a la producción de energía eléctrica a través de almacenamiento en embalses (Harrold, Schwab y Bonduran, 1976).

El análisis histórico del comportamiento de las características de las lluvias por métodos estadísticos probabilísticos es una herramienta de *primerísima utilidad para la comprensión de su comportamiento* y toma de decisiones sobre aplicación de prácticas útiles para el manejo productivo y conservacionista de los suelos (labranza, riego, drenaje, etc). A este respecto es posible trabajar con probabilidades mensuales, semanales y aún diarias de la cantidad de lluvia que podría esperarse, así como de los balances hídricos lo que permitirá planear razonablemente las prácticas de riego y de drenaje cuando ellas sean necesarios y diseñar prácticas de labranza y de manejo de suelos para aumentar el mojado del perfil en áreas de producción intensiva (Amézquita, 1974; Ortotani y Camargo, 1987).

En la fig. 3 se presenta la probabilidad semanal de caída de lluvia en Carimagua con una probabilidad del 80%, determinada a partir de 20 años de registro consecutivo. La figura muestra que es seguro tener lluvias desde la semana 16 hasta la 43 (probabilidad igual a 1.0, escala lado derecho). Así mismo, la gráfica muestra, las cantidades probables de lluvia que caen con una confiabilidad del 80%. Por ejemplo, en la semana 21 es seguro que llueva porque la probabilidad es igual a 1.0 y con un 80% de certeza pueden esperarse lluvias entre 70 y 250 mm.

En la fig. 4 se muestra el comportamiento probabilístico de caída de lluvias, cuando cae cualquier cantidad y cuando se consideran aquellas iguales o mayores a 25 mm. Se observa para el segundo caso, que durante las semanas 18 a 40 hay una alta probabilidad de caída de lluvias superiores a 25 mm.

El estudio de la intensidad en términos de energía y la probabilidad de ocurrencia de eventos máximos para diferentes periodos de retorno es indispensable para el planeamiento de prácticas de control de erosión utilizando los criterios de la ecuación universal de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith,

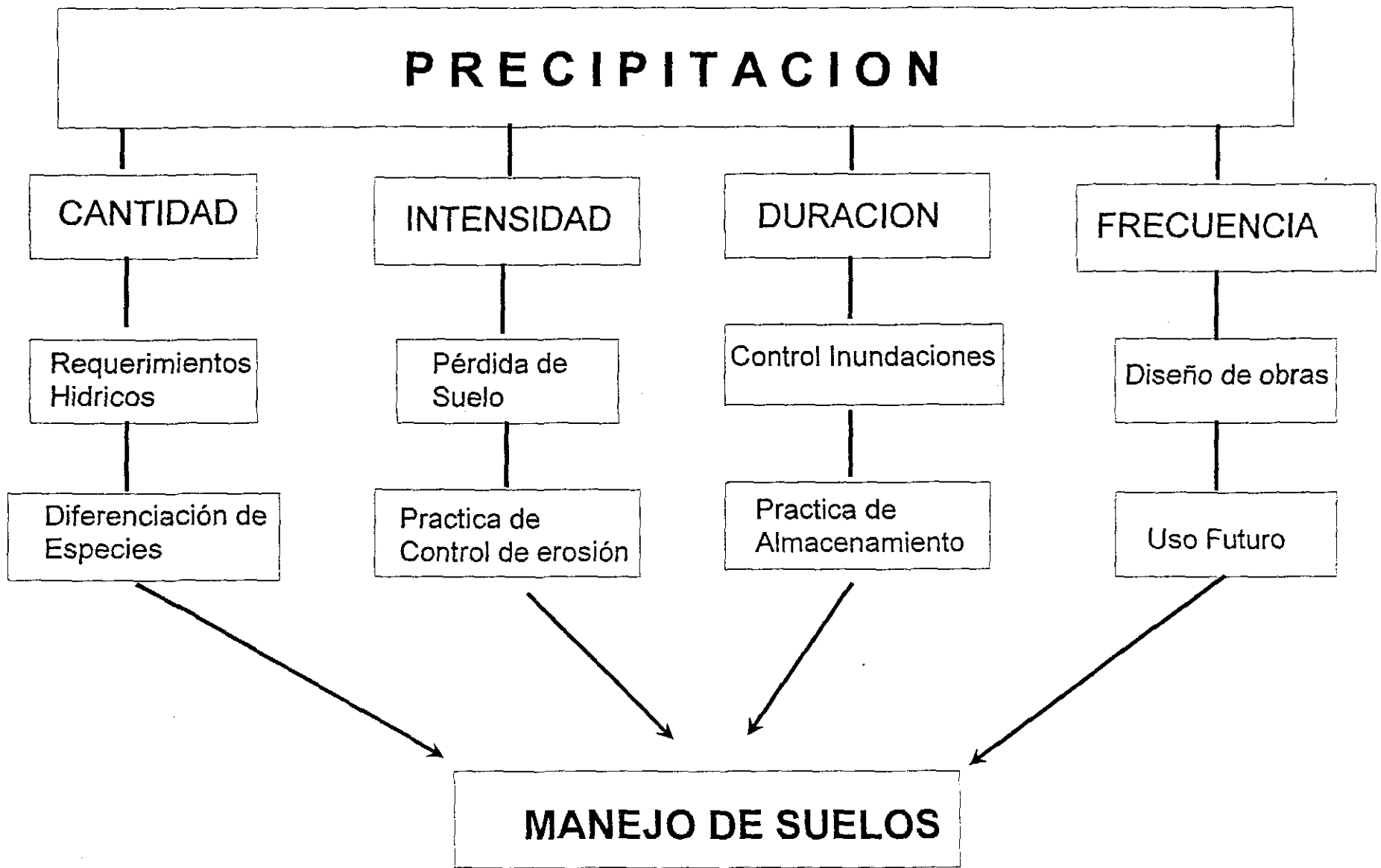


Figura 2. Relación entre la precipitación y el manejo de los suelos como recursos naturales en los sistemas de producción agrícola.

Probabilidad de caída de lluvia e Intervalo de Confianza (al 80%) de Precipitación Semanal en Carimagua (20 Años de Registro)

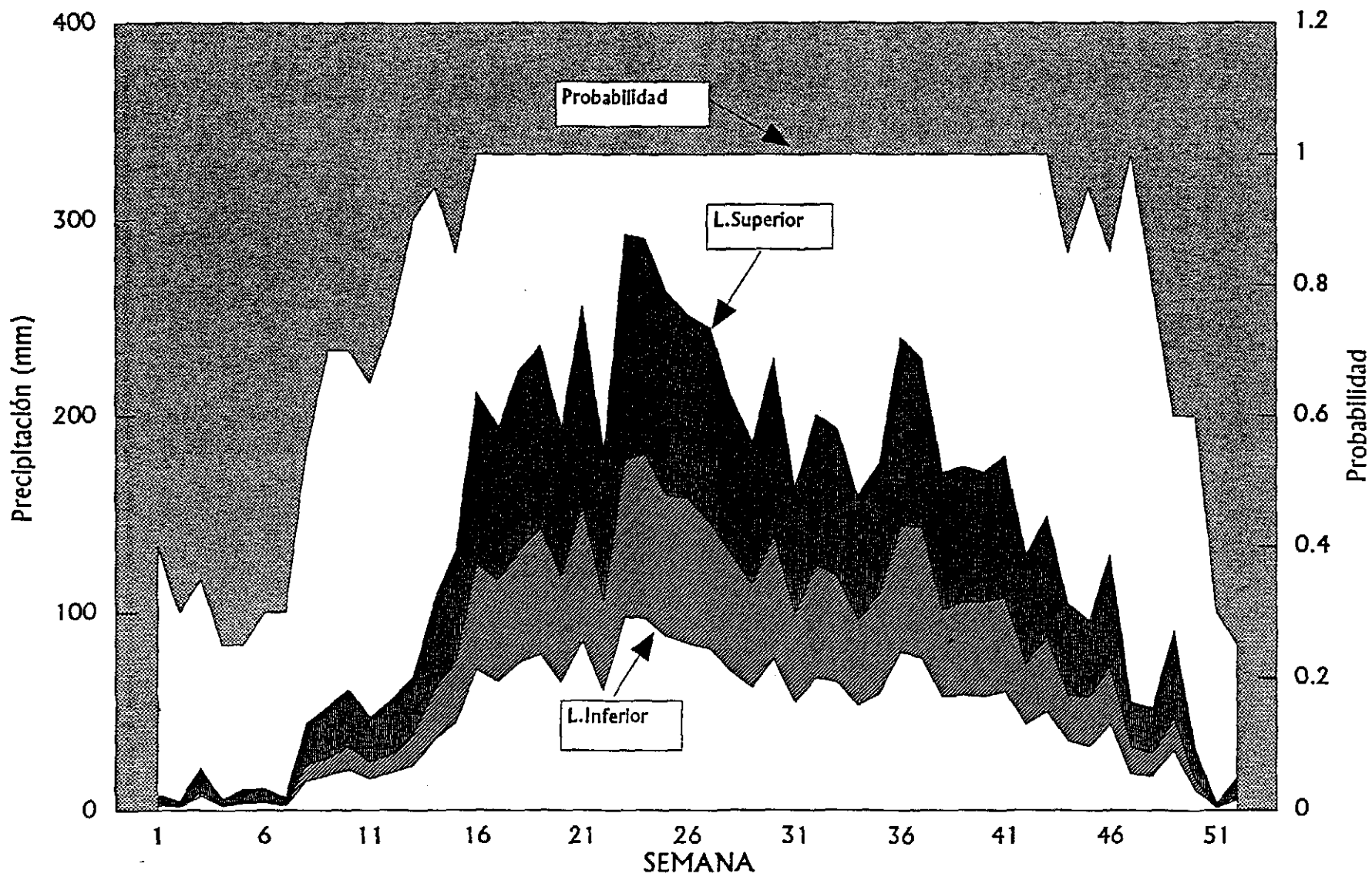


FIG. 3

# Probabilidad Semanal de Caída de Lluvia en Carimagua (20 Años de Registro)

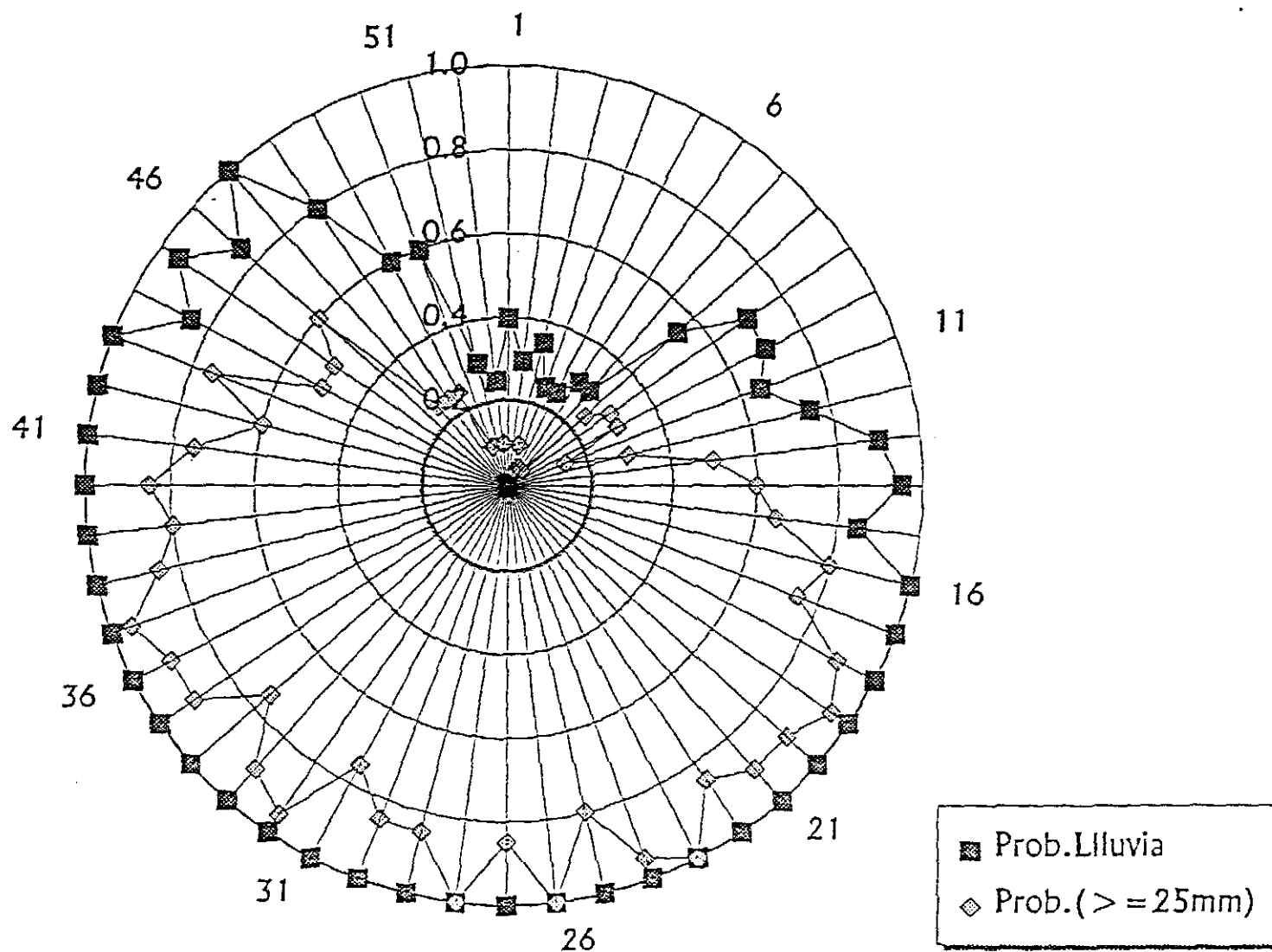


FIG. 4

1978).

El estudio de los balances hídricos, basados en análisis climatológicos históricos y en las características físicas del suelo relacionados con almacenamiento de agua, profundidad de enraizamiento, compactación, encostramiento superficial, capacidad de aireación, infiltración, etc., es de primerísima utilidad para el manejo y planeación de prácticas agronómicas. El conocimiento de las propiedades del perfil del suelo previo y durante su uso agrícola es también por lo tanto de fundamental importancia para el planeamiento del uso de las tierras.

## **B. RELACION ENTRE LAS PROPIEDADES FISICAS Y EL PROCESO DE NUTRICION DE LAS PLANTAS.**

Debido al geotropismo las raíces se desarrollan en el suelo y crean en él un ambiente único, en el cual se suceden continua e instantáneamente infinidad de reacciones químicas, físico-químicas y biológicas, cuya calidad e intensidad, determinan la capacidad del suelo para suplir las necesidades nutritivas de las plantas.

La dinámica de los procesos de absorción de agua y nutrimentos, es influenciada por el comportamiento de las fases sólida, líquida y gaseosa del suelo y es regida por leyes termodinámicas, las cuales a su vez determinan la magnitud, intensidad, calidad y oportunidad del suministro de nutrientes y del intercambio iónico en las interfases suelo-solución-planta, procesos por medio de los cuales se nutren las plantas. La tabla 1, muestra la secuencia de transformaciones que debe sufrir un elemento esencial para convertirse en nutriente, así como los factores que afectan las transformaciones (Amézquita, 1991).

Para que un elemento nutritivo que se encuentra en el suelo pueda ser absorbido por la planta es necesario que entre en contacto con la raíz. El contacto se realiza mediante tres fenómenos:

a) Interceptación por las raíces; b) Flujo de masa y c) difusión (Baber, 1984; Malavolta, et al, 1989).

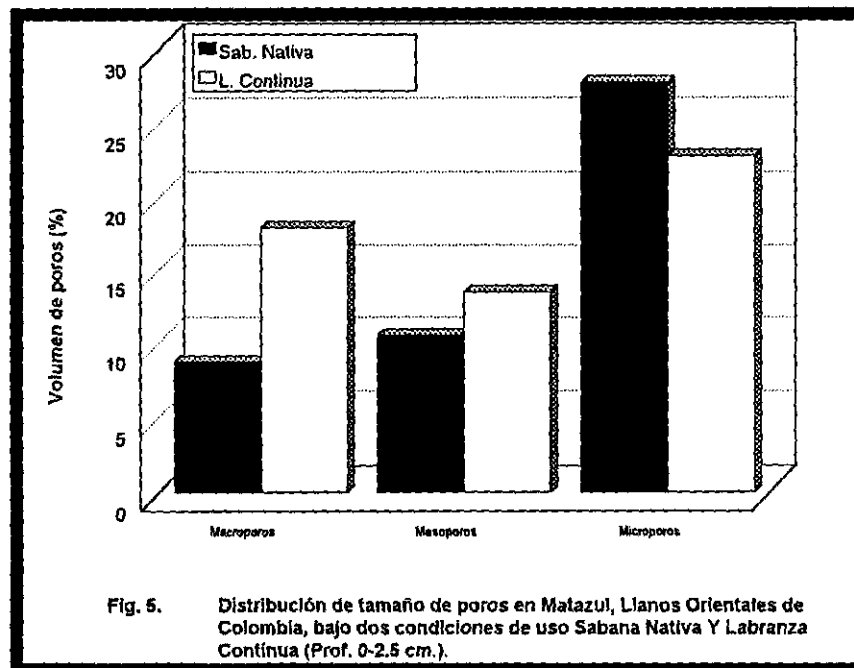
En el proceso de interceptación, las raíces a medida que crecen encuentran el elemento en la solución del suelo y se ponen en contacto con él. En el proceso de flujo de masa el nutriente se traslada en la fase acuosa (solución del suelo) del suelo obedeciendo a gradientes de potencial hidráulico entre capacidad de campo y punto de marchitez, creados por el proceso de evapotranspiración. Mediante el proceso de difusión el elemento se mueve en distancias muy cortas dentro de una fase acuosa estacionaria, de una región de alta concentración a otra de baja concentración muy cercana a la superficie de la raíz. Existe relación estrecha entre estos procesos y la distribución de tamaño de poros, la interceptación ocurre fundamentalmente por macroporos, el flujo de masa por los mesoporos y la difusión por los microporos (distribución tamaño de poros, Matzul fig. 5) (Amézquita, 1994; Greenland, 1979).

La absorción de agua y de nutrientes y su posterior transporte dentro de la planta exigen que no debe haber limitaciones de agua en el suelo que disminuyan o impidan la transpiración y que debe haber una suplencia adecuada y oportuna de nutrimentos del suelo a la planta tanto en cantidad como en



**Tabla 1. Factores que influyen en el proceso nutricional y propiedades físicas que lo afectan**

FUENTE DE NUTRIENTES →	FORMAS DISPONIBLES →	CONTACTO CON LA SUPERFICIE → RADICULAR	TOMA Y USO POR LA PLANTA
1. Materia Orgánica 2. Textura 3. Potencial de agua 4. Estructura 5. Aireación 6. Temperatura 7. Erosión	1. C.I.C. 2. Mineralización de materia orgánica 3. Humedad del suelo 4. Aireación 5. Temperatura 6. Capacidad de reposición 7. Lixiviación	1. Movimiento de los nutrientes en la solución - Distribución de poros 2. Crecimiento radicular - Penetrabilidad - Estructura - Humedad - Aireación - Temperatura	1. Presencia y disponibilidad de nutrimentos 2. Potencial osmótico de la raíz. 3. Potencial de humedad 4. Presión de oxígeno 5. Temperatura



calidad.

Usualmente, bajo condiciones de campo, las exigencias de transporte oportuno de agua dentro del sistema suelo-planta-atmósfera no se cumplen (Reichardt, 1985). La transpiración que debe tender a equilibrar la demanda evaporativa del ambiente, se ve limitada por la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo, por la disminución en la conductividad hidráulica de éste a medida que disminuye la humedad almacenada, por la distribución de las raíces, por la permeabilidad de las raíces y capacidad conductiva de agua por las plantas, por la contracción de las raíces cuando la demanda es excesiva y el suelo es incapaz de conducir el agua a las velocidades requeridas, etc. Todos estos factores dentro de un esquema de manejo productivo de suelos, deben ser comprendidos y optimizados mediante prácticas de manejo de suelos oportunas y bien enfocadas.

La suplencia adecuada y oportuna de nutrimentos en cantidad y calidad también puede verse limitada por factores tales como: baja disponibilidad de nutrimentos, carencia de alguno o algunos de ellos, baja solubilidad, antagonismo iónico, bajo contenido de humedad, deficiencia en la distribución de raíces, baja capacidad de aireación del suelo, etc.

Los planteamientos anteriores, muestran que para poder nutrir adecuadamente una planta, se deben considerar tanto los factores climatológicos como los edafológicos. En estos últimos, es necesario considerar los químicos y biológicos que conducen a la suplencia de nutrimentos y los físicos que conducen a suplencia adecuada de agua y de aire para la respiración de las raíces.

El manejo edafológico (Tabla 2) del suelo en relación con la nutrición vegetal debe velar porque en él existan todos los nutrimentos esenciales, utilizando prácticas de fertilización acordes con los requerimientos locales de los cultivos y de los suelos y por otra parte, porque en él exista una buena distribución de poros especialmente macro y meso que son los que regulan la aireación, el crecimiento de las raíces, y los procesos de flujo de masa y de difusión de los nutrimentos, todos esenciales para que se suceda activamente y permanentemente el proceso nutritivo (Amézquita, 1994).

**Tabla 2. Factores edáficos de crecimiento de las plantas.**

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Presencia y disponibilidad de los elementos nutritivos esenciales.</li> <li>2. Succión del agua del suelo</li> <li>3. Aireación en la zona radicular</li> <li>4. Resistencia mecánica a la penetración de raíces</li> <li>5. Temperatura del suelo</li> </ol> |
|---|

### **C. EL PERFIL CULTURAL Y MANEJO FISICO DE SUELOS.**

**Perfil cultural:** Desde el punto de vista edafológico es el volumen de suelo que puede ser explotado por las raíces de las plantas. Está constituido por la sucesión de capas individualizadas por la

intervención de implementos de labranza, de las raíces y de los factores resistentes a las intervenciones (Gautronneu y Manichon, 1987).

El principal objetivo a tener en cuenta en manejo de suelos en el tropico, es el de la construcción de una capa arable, concepto que debe entenderse como la obtención de una capa de crecimiento de raíces que no posea limitantes ni físicas, químicas ni biológicas para el buen desenvolvimiento de las plantas. Obtenida una capa arable consistente y productiva es posible hacer sobre ella una agricultura sostenible. La labranza y la aplicación de enmiendas químicas y de fertilizantes, en combinación con un manejo biológico adecuado del suelo deben convertirse en prácticas constructivas (agradativas) del suelo y no degradativas, como generalmente acontece.

En el perfil cultural, debe haber suficiente disponibilidad de los elementos nutritivos como para que no se presenten deficiencias nutricionales, debe ser capaz de almacenar y transmitir suficiente cantidad de agua a las raíces como para que las plantas no sufran ningún estrés hídrico, debe poseer suficiente espacio aéreo como para que no se presenten deficiencias en la respiración de las raíces y en la toma de nutrimentos, debe dejarse penetrar fácilmente por las raíces de las plantas de tal manera que ellas exploren un buen volumen de suelo para absorción de agua y de nutrimentos y por último debe poseer buenas características térmicas que le permitan al suelo ofrecer un buen rango de temperatura para la realización de todas las reacciones fisico-químicas que tienen que ver con la disponibilidad y absorción de nutrimentos y de agua.

La investigación en suelos es exitosa en la medida en que conduzca al conocimiento del control de los factores mencionados através de prácticas de manejo que tiendan al mejoramiento integral del suelo para asegurar su sostenibilidad.

#### **D. FACTORES DEL SUELO EN LA EVALUACION DE LA SOSTENIBILIDAD.**

La riqueza del suelo puede evaluarse através de la calidad de la zona de raíces (Dumanski, 1993). Los factores biofísicos que determinan la calidad del suelo en la zona radicular y que consecuentemente afectan la producción agrícola, incluyen la densidad aparente, las propiedades hidráulicas, la fertilidad y disponibilidad de nutrientes, la presencia de toxicidades, etc. Indices objetivos para evaluar el impacto de los sistemas de producción agrícola en el recurso suelo y en el ambiente pueden basarse en observaciones de uno o más de esos factores. Sin embargo, para ser viables, los indices de sostenibilidad deberían incluir consideraciones de sensibilidad a cambios de manejo y variabilidad en tiempo y espacio (Lal, 1994) y además ser fáciles de medir. Lal (1994), ha sugerido diferentes escalas para la evaluación de varios indicadores de sostenibilidad (Tabla 3). Las definiciones de sostenibilidad deberían también incluir ideas de reversibilidad e irreversibilidad en términos biofísicos y económicos.

**Tabla 3. Escalas temporales para la evaluación de cambios en las propiedades y procesos del suelo inducidos por el manejo.**

Propiedades/Procesos	Escala temporal (años)	Escala de sistemas
Procesos del suelo - Erosión - Compactación - Acidificación - Disminución de fertilidad	- 5 a 20 años - Uno a varios ciclos - Uno a varios ciclos - 5 a 20 años	- Ladera y cuenca - Parcelas de campo y fincas - Asociación de suelos - Asociación de suelos y fincas
Propiedades del suelo - Físicas - Químicas - Biológicas	- Uno a varios ciclos - Uno a varios ciclos - Uno a varios ciclos	- Asociación de suelos y fincas - Asociación de suelos y fincas - Asociación de suelos y fincas

#### **D.1. FACTORES FISICOS E HIDROLOGICOS DEL SUELO**

Las propiedades físicas e hidrológicas de los suelos tropicales más susceptibles a cambio por las acciones de manejo de suelos y de cultivos, y por el tiempo de uso se presentan en la tabla 4. El uso indebido e indiscriminado de implementos agrícolas en suelos frágiles de áreas planas donde es posible hacer agricultura intensiva, trae como consecuencia la aceleración de los procesos degradativos que se presentan en la tabla y por lo tanto la insostenibilidad de suelos y de sistemas de producción. Es necesario hacer investigaciones que conduzcan al desarrollo de metodologías no degradativas para el manejo sostenible de los suelos.

**Tabla 4. Propiedades físicas e hidrológicas y procesos que afectan la calidad del suelo**

Atributos físicos e hidrológicos	Procesos
Propiedades físicas - Textura - Estabilidad de agregados - Densidad aparente - Distribución de tamaño de poros	Degradación estructural y erosión - Compactación - Encostramiento y sellamiento - Infiltración y lixiviación - Escorrentia
Propiedades hidrológicas - Conductividad hidráulica - Retención de agua - Velocidad de infiltración	

## D.2. FACTORES QUIMICOS Y DE FERTILIDAD

Los procesos químicos que afectan la sostenibilidad de los sistemas agrícolas incluyen: Acidificación del suelo, disminución de nutrientes y pérdida de materia orgánica (Tabla 5). La acidez del suelo está principalmente determinada por su composición mineralógica la cual esta relacionada con el grado de meteorización. Los suelos dominados por arcillas de baja actividad tales como la caolinita y por óxidos e hidróxidos de Fe y Al poseen baja capacidad de intercambio catiónico y a menudo están altamente saturados con Al intercambiable. La acidez del suelo es posteriormente aumentada por el uso de prácticas agrícolas. La preparación de suelos promueve la oxidación de la materia orgánica, la cual es acompañada de la producción de iones hidrógeno. Similarmente ciertos fertilizantes, en particular aquellos que poseen N reducido como la urea y el sulfato de amonio, generan iones hidrógeno durante el proceso de nitrificación. Los cultivos que presentan patrones ácidos de toma de nutrientes como las leguminosas, también producen acidez.

**Tabla 5. Propiedades químicas y nutricionales y procesos que afectan las cualidades del suelo**

Atributos químicos del suelo	Procesos
Suelos ácidos - pH - Acidez total - Al intercambiable	Acidificación - Meteorización mineral - Transformación de nutrientes - Mineralización de materia orgánica - Patrones de absorción de las plantas (ácidos y alcalinos) - Lixiviación
Requerimientos nutricionales - CEC - Cationes intercambiables - Capacidad de adsorción de P - Disponibilidad de P y S - N, P y S orgánico e inorgánico	Disminución de nutrientes - Exportación por los cultivos - Reciclaje - Fertilización - Mineralización - Lixiviación - Fijación
Contenido de materia orgánica - Contenido total de C orgánico - Pools de C lábil y estable	Pérdida / secuestro de carbono - Mineralización / oxidación - Humificación - Estabilización / fijación

En suelos altamente dominados por arcilla de baja actividad, la capacidad de intercambio catiónico ocurre en superficies de carga variable. Consecuentemente el mayor efecto de incrementar la acidez del suelo, a través de los procesos descritos arriba, es la pérdida de la capacidad de retención de cationes por el suelo. Bajo condiciones de lixiviación los cationes liberados de la superficie de carga

variable se mueven hacia abajo através del perfil del suelo acompañado por aniones aplicados como fertilizantes ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{Cl}$ - y  $\text{SO}_4$ -2) o producidos durante la mineralización de materia y residuos orgánicos. Bajo tales condiciones la aplicación de cal puede tener relativamente bajo valor residual, especialmente cuando se acompaña de alta tasa de aplicaciones de fertilizantes, esto puede verse en la fig. 6, la cual ilustra la pérdida de Ca de la capa arable del perfil y el desarrollo de acidez en un ultisol arenoso encalado a varias dosis y cultivado con una rotación maíz-cowpea por 5 años.

Es fundamental conocer que al menos bajo condiciones donde la precipitación sobrepasa la evapotranspiración, los sistemas de producción natural y agrícola promueven el incremento de la acidez a varias velocidades, si no se toman medidas correctivas. Consecuentemente, aquellos sistemas agrícolas, especialmente los desarrollados en suelos altamente meteorizados y de débil capacidad buffer requieren de un monitoreo regular de la acidez. Como indicadores de la acidez se incluyen: mediciones de pH, Al intercambiable y acidez total. Diferentes cultivos y pasturas a menudo tienen muy variados niveles de tolerancia a la acidez. Esto tiene dos consecuencias muy importantes: primero, se requiere para diferentes cultivos, diferentes niveles de aplicación de cal. Segundo, sistemas de producción basados en bajos niveles de cal, serán necesariamente limitados a componentes que tengan niveles de tolerancia requeridos que se acoplen al nivel de acidez del suelo.

Los suelos altamente meteorizados del ecosistema húmedo tropical de Sur América son bajos en nutrientes totales y aprovechables. Mientras el mejoramiento germoplásmico basado en la tolerancia de cultivos a baja fertilidad del suelo permite incrementar la explotación de tales suelos, adiciones externas son esenciales para sostener una producción agrícola. Sin adiciones el mejor germoplasma llevará a más explotación del recurso base y a la disminución de nutrientes.

Por otro lado, la habilidad de estos suelos para retener nutrientes contra la lixiviación es muy baja con excepción del P, debido a su baja capacidad de intercambio catiónico. Por tanto, la aplicación de nutrientes debe ser manejada y balanceada cuidadosamente de modo a que una aplicación excesiva no ocasione índices de contaminación. Una nutrición balanceada, requiere que las relaciones entre requerimientos de los cultivos, niveles nutritivos del suelo y aplicación de fertilizantes sea cuidadosamente definida. Usualmente estas relaciones son específicas para localización y cultivo, pero aunque sean definidas con cierta amplitud para asociaciones de suelo y tipo de cultivo, pueden conducir a mejoramientos significantes en la eficiencia de uso de nutrientes.

En suelos con baja reserva de nutrientes minerales, las reservas orgánicas de P ( y de N y S) adquieren mucha importancia. Los estudios de fraccionamiento de P, muestran incrementos sustanciales en las reservas de P lábil, en sistemas que reciben aplicación de P. Los análisis convencionales para P, no reflejan adecuadamente el estado del nutriente, ni el grado de ciclaje dentro del sistema. Se requiere del desarrollo y evaluación de nuevos indicadores que tomen en consideración la dinámica de las reservas orgánicas de los nutrientes.

Los procesos de pérdida y acumulación de materia orgánica son básicos para la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola de secano, porque los compuestos orgánicos están estrechamente

relacionados con factores de calidad del suelo como: estructura, agua aprovechable, ciclaje de nutrientes y actividad biológica. Bajo cultivo el contenido de materia orgánica total disminuye. Intentos para recuperar estas disminuciones con altas aplicaciones de residuos de cultivos u otros tipos de biomasa orgánica ha tenido solo éxitos marginales. Fracciones activas o lábiles de materia orgánica pueden ser indicadores más sensibles de la calidad del suelo que el contenido total de materia orgánica. Gijsman y Thomas (1994), por ejemplo, obtuvo una fuerte correlación entre estabilidad estructural y carbono orgánico soluble en un Oxisol Colombiano.

### D.3. FACTORES BIOLÓGICOS DEL SUELO

El importante papel que juegan la macrofauna y la microflora del suelo en el mantenimiento y mejoramiento de la calidad del suelo, se presenta en la tabla 6. La macrofauna está involucrada en el fraccionamiento e incorporación de los residuos orgánicos y en su conversión a materia orgánica del suelo. Consecuentemente, su actividad tiene influencia significativa en la estructura y en el ciclaje de nutrientes. La dinámica y la población de la macrofauna son influenciadas fuertemente por las prácticas de manejo de las tierras.

**Tabla 6. Propiedades y procesos biológicos y bioquímicos que afectan la calidad del suelo**

Atributos biológicos y bioquímicos del suelo	Procesos
Macrofauna del suelo: - Diversidad y población de especies - Actividad de la macrofauna	Bioperturbación: - Formación de la estructura - Flujo de agua y lixiviación - Incorporación de residuos orgánicos
Microflora y fauna - Diversidad y actividad de rhizobium spp. - Actividad microbial - Actividad de enzimas	Ciclaje de nutrientes: - Fijación biológica de N - Carbono orgánico (mineralización / oxidación) - Mineralización e inmovilización de nutrientes.

Muestreos hechos en los Llanos de Colombia (Decaëns et al., 1994) han mostrado que la macrofauna se incrementa bajo pasturas mejoradas, mientras que ha habido impacto negativo bajo cultivos anuales (fig. 6) el papel principal de la fauna del suelo los constituyen el ciclaje de nutrientes y la dinámica del carbono (tabla 6). Los microbios son responsables de la mineralización y de la inmovilización de nutrientes en la materia orgánica. Por consiguiente estos atributos pueden servir como indicadores útiles del ciclaje de nutrientes y de lo saludable del sistema.

Individuals  $m^{-2}$  (thousands)

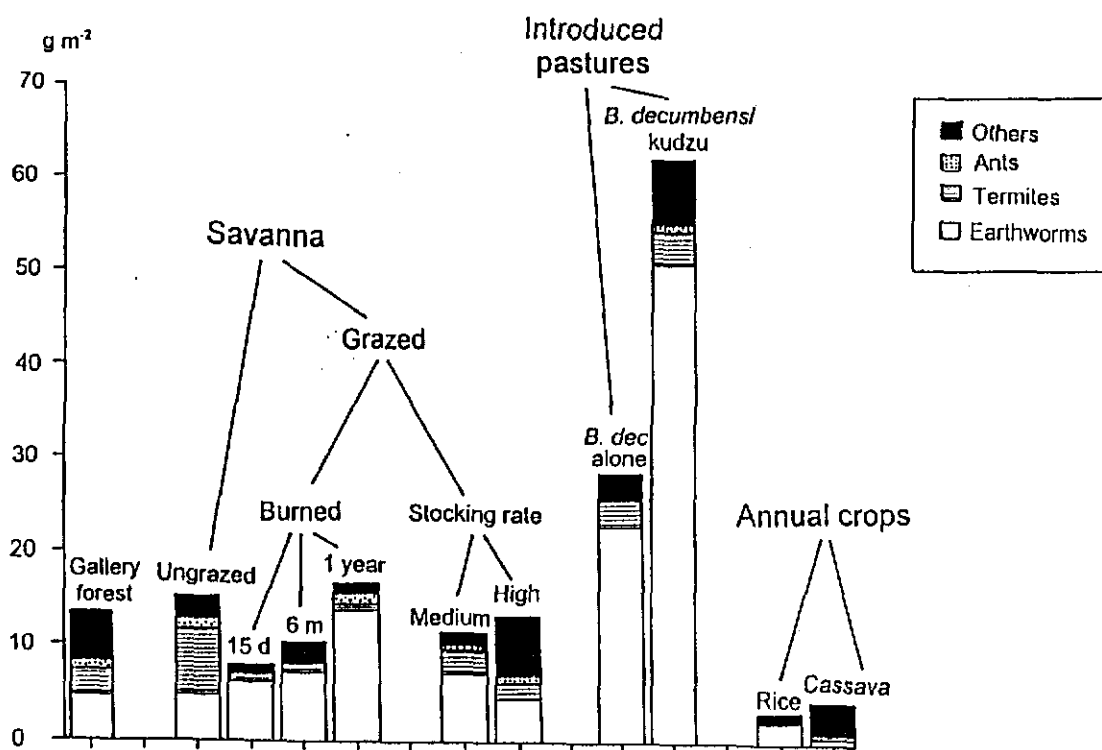
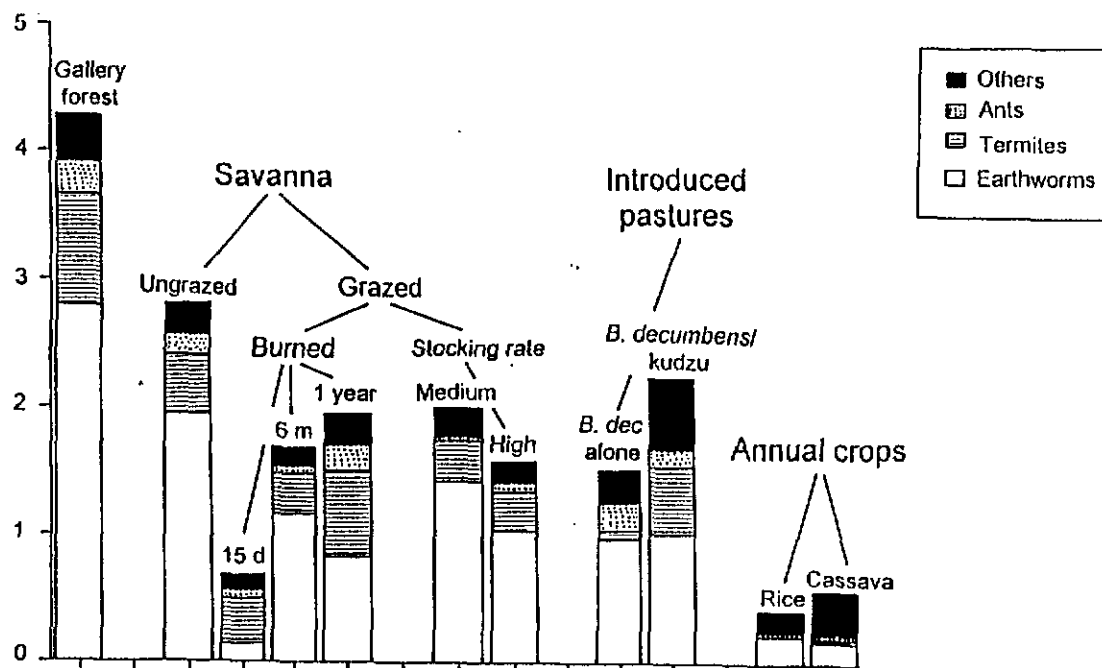


Figura 6. La distribución de la densidad (a) y la biomasa (b) de macrofauna en tierras de manejo diferente en los llanos orientales de Colombia (Deccaëns et al, 1994).



## E. ESTIMACION DE LA SOSTENIBILIDAD ATRAVES DE MODELAJE

Como se indico en la discusión de escalas, en la evaluación de sostenibilidad, las observaciones de indicadores pueden requerir varios años o decadas para determinar cambios significativos en la calidad del suelo. Observaciones sobre el efecto del manejo de recursos son amenudo específicas de una localización lo cual hace dificil la extrapolación a otros sitios. Adicionalmente por el costo de conducir experimentos a largo plazo para evaluar cuestiones de sostenibilidad, no es posible incluir todas las opciones de manejo, pero se pueden introducir en programas de modelajes.

Los factores que determinan si un sistema agrícola es sostenible o insostenible son numerosos, complejos e interactivos. Los modelos mecanísticos se constituyen en una herramienta poderosa para integrar nuestros conocimientos en sistemas de producción venciendo las limitaciones de escala y de especificidad de sitios. Los modelos mecanísticos se enfocan en una caracterización cuantitativa y en el entendimiento de procesos que operan a varios niveles dentro de los sistemas de producción y en los efectos que el clima, las propiedades del suelo y las prácticas de manejo tienen en ellos. Existen varios tipos de modelos o familias de modelos que simulan el crecimiento de cultivos o la función del ecosistema dentro de la relación suelo-agua-atmósfera continuum. Estos modelos tienen diferentes atributos o enfoques dependiendo de su intención.

La investigación en recursos naturales del Ciat esta enfocada en el uso de dos modelos como una base para integrar su investigación en el desarrollo de sistemas de producción sostenible para los suelos tropicales ácidos de las tierras bajas. Estos son la familia de CERES para producción de cultivos (Tsuji et al., 1994) y el modelo CENTURY para materia orgánica (Parton et al., 1987). El primero agrupado dentro del contexto de DSSAT simula el crecimiento y desarrollo de un rango de cultivos importantes (cereales, leguminosas, raíces y tuberculos) bajo condiciones variables de clima y limitaciones de agua y nutrientes (actualmente limitado a N pero iniciando su desarrollo para P). Estos modelos ahora tienen la capacidad de secuencia para permitir la evaluación de efectos de varias estaciones. CENTURY esta enfocado a la dinamica de C, N, P y S y fue desarrollado originalmente para las grandes areas de pastos naturales en Norteamerica. La evaluación de este modelo en CIAT para los oxisoles en las sabanas de Suramerica, a revelado varias debilidades debido a la baja fertilidad de P en estos suelo (Gijzman et al, 1995).

El uso de modelos en la evaluación de sistemas sostenibles de manejo de tierras está limitado entre otros factores por un vacio en nuestro conocimiento técnico el cual no permite predecir los efectos a largo plazo, ni la importancia de procesos sutiles. Además existe un entendimiento incompleto de procesos, de su complejidad y de sus interacciones lo cual coduce inevitablemente a una gran simplificación que puede resultar en conclusiones erróneas cuando se aplican a largo plazo. Los modelos son utiles para explorar los posibles efectos de nuevos métodos o alternativas de uso de tierras, explorando tendencias y comparando los efectos de estrategias alternativas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AMEZQUITA, E. 1974. Estudios hidrológicos y edafológicos para conservación de agua y suelos en Turrialba. Costa Rica. IICA-CATIE, Turrialba, Costa Rica. Tesis de Mg. Sci. 221.
- AMEZQUITA, E. 1981. A study of the water regime of a soil during approach to field capacity and wilting point. University of Reading, Soil Sci. Department. Ph. d. Thesis. 224.
- AMEZQUITA, E. 1989. Algunas consideraciones agroclimáticas y edáficas para maximizar la productividad en sistemas de producción agrícola. In, Seminario Taller sobre investigaciones en sistemas de producción. ICA - CIID. Tibaitatá, Bogotá. 72-89.
- AMEZQUITA, E. 1991. Procesos dinámicos del suelo y nutrición vegetal. XXI Congreso anual y 1er. Simposio Nacional sobre Fisiología de la Nutrición Mineral. Comalfe. Manizales 20-22, febrero de 1991.
- AMEZQUITA, E. 1994. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. In, Fertilidad de suelos, Diagnostico y control, Soc. Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá 137-154.
- BARBER, S.A. 1984. Soil nutrient bioavailability; a mechanistic approach. New York, John-Wiley. 398 p.
- DECAËNS, T., P. LAVELLE, J.J. JIMENEZ JAEN, G. ESCOBAR y G. RIPPSTEIN. 1994. Impact of land management on soil macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia. Eur. J. Soil Biol. 30: 157-168.
- DUMANSKY, J. 1993. Proceedings of the International Workshop on Sustainable Land Management for the 21st Century. Volume 1: Workshop Summary. The Organizing Committee. International Workshop on Sustainable Land Management. Agricultural Institute of Canada, Ottawa. 50 p.
- FRIESEN, D.K., A.S.R. JUO y M.H. MILLER. 1982. Residual value of lime and leaching of calcium in a kaolinitic Ultisol in the high rainfall tropics. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 1184-1189.
- GAUTRONNEAU, Y. y MANICHON, H. 1987. Guide methodique du profil cultural. Gera-Ceref. Paris. 71 p.
- GIJSMAN, A.J., A. OBERSON, H. TIESSEN y D.K. FRIESEN. 1996. A cautionary note about the applicability of the CENTURY soil-organic-matter model to ecosystems on highly-weathered tropical soils. Agron. J., submitted.
- GIJSMAN, A.J., y R.J. THOMAS. 1995. Aggregate size distribution and stability of an Oxisol under legume-based and pure grass pastures in the eastern Colombian savannas. Aust. J. Soil Res. 33: 153-65.

- GREENLAND, D. J. 1979. Estructural organization of soil and crop production. In, D.J. Greenland and R. Lal, eds., soil physical conditions and crop production in the tropics. Chichester, England. 45-57.
- HARROLD, L.L., SCHWAB, G.O. Y BONDURANT. 1976. Agricultural and forest Hydrology. Ohio State University. University Bookstore. 273 p.
- LAL, RATTAN. 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. SMSS Technical Monograph No. 21. Soil Mangement Support Services, Washington, D.C.
- MALAVOLTA, E., VITTI, G.C. y DE OLICEIRA, S.A. 1989. Availacao do estado nutricional das plantas: principios e aplicaciones. Associacao Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Potafos. Piracicaba, Brasil.
- ORTOTANI, A. y CAMARGO, M.B.D. 1987. Influencia do factores climaticos na producao. In, Ecologia do producao agricola. Associacao Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Potafos. 200 p.
- OBERSON, A., D.K. FRIESEN, H. TIESSEN y J.O. MOIR. 1995. Improved pastures and phosphorus inputs increase phosphorus cycling in a Colombian Oxisol. Soil Sci. Soc. Am. J., submitted.
- PARTON, W.J., D.S. SCHIMEL, C.V. COLE, y D.S. OJIMA. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. Soil Sci. Soc. Am. J. 51:1173-1179.
- REICHART, K. 1985. Procesos de transferencia no sistema solo-planta-atmósfera. 4 ed. Campinas. Fundacao Cargill, Brasil. p. 286.
- TSUJI, G.Y., G. UEHARA y S. BALAS (eds.). 1994. DSSAT v3. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- WISCHMEIER, W.H. y D.D. SMITH. 1978. Predicting rainfall erosion losses. Aguide to conservation planning. USDA. Handbook 537.