

## Modelo para evaluar la calidad de las tierras: caso del cultivo de papa

### A model for evaluating land quality: the case of potato cropping

Luis Joel Martínez<sup>1</sup>

**Resumen:** Dentro de la búsqueda de la sostenibilidad y la competitividad de la agricultura, la evaluación de la calidad de las tierras es un aspecto básico que permite tomar decisiones sobre las áreas más apropiadas para ubicar los cultivos y sobre los procesos de degradación de las tierras, con el fin de tomar medidas para su manejo y conservación. En esta investigación se desarrolló un modelo, en una zona montañosa dedicada al cultivo de la papa en Cundinamarca (Colombia), que permite evaluar la calidad de las tierras. El modelo se basa en análisis espacial, integra indicadores de calidad de las tierras con tecnologías como los sistemas de información geográfica, las imágenes de satélite, las bases de datos y de conocimiento, con el fin de apoyar la toma de decisiones sobre uso, manejo y conservación de las tierras. En la zona estudiada se encontró que la erosión es uno de los procesos que tiene mayor efecto en la calidad de las tierras; también se evaluaron otros indicadores como la disponibilidad de agua, las condiciones de enraizamiento, las condiciones para la mecanización y el drenaje. Se realizó un análisis entre la ubicación de los cultivos de papa, la calidad de la tierra y la altitud. El enfoque del modelo permite que sea adaptado para evaluación de la calidad de las tierras en otras zonas y para otros tipos de uso.

**Palabras claves adicionales:** calidad de tierras, modelos, SIG, cultivo de papa

**Abstract:** Evaluating land quality is a basic aspect when making decisions regarding the most suitable areas for growing each crop and land degradation and conservation to ensure agricultural sustainability and competitiveness. A spatial model was developed in this research for evaluating land quality for potato cropping in a mountainous area of Cundinamarca (Colombia). The model is based on spatial analysis, integrating land quality indicators with technologies such as GIS and satellite image data. Erosion was the most important process affecting land quality in more than 70% of the area. Other land indicators were water availability, rooting conditions, soil drainage and potential for mechanisation. The model approach could be adapted for land quality evaluation in other areas and other types of land use.

**Additional key words:** land quality, spatial model, GIS, potato crop

### Introducción

LOS RETOS ACTUALES DE LA AGRICULTURA de ser sostenible y competitiva implican el desarrollo de métodos apropiados para la evaluación y monitoreo del estado de las tierras, buscando una ubicación adecuada para los cultivos, de manera que se logre mayor efi-

ciencia en la producción y en el uso de los recursos e insumos. La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación) considera que el manejo sostenible de las tierras debe cumplir cuatro criterios: la producción se debe mantener, los riesgos no deben aumentar, la calidad de las tierras se debe mantener y el sistema debe ser económica-

Fecha de recepción: 13 de marzo de 2006  
Aceptado para publicación: 11 de mayo de 2006

<sup>1</sup> Profesor asociado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: ljMartínez@unal.edu.co

mente viable y socialmente aceptable (FAO, 1995). En tal sentido el concepto de calidad se plantea como un aspecto importante de la evaluación de la sostenibilidad de las formas de uso, de manejo de las tierras y para establecer su aptitud de uso (Pierce y Larson, 1993; FAO, 1997). Se parte de la premisa de que el uso y el manejo pueden cambiar la calidad de las tierras y esos cambios son básicos para determinar la sostenibilidad del respectivo uso.

El concepto de calidad se ha desarrollado y aplicado ampliamente en la industria y, desde hace algunos años, se utiliza para evaluar los recursos naturales. Etimológicamente se deriva del latín *qualitas*, que se refiere a un conjunto de cualidades de una persona o cosa. La calidad, en su contexto general, se puede definir como un conjunto de propiedades inherentes a un ente que permiten apreciarlo como igual, mejor o peor que un modelo establecido.

Algunas veces se hace referencia a calidad del suelo (Doran y Jones, 1996), otras, a calidad de tierra (FAO, 1997; Bouma, 2002) y a veces se utilizan indistintamente como si fueran equivalentes. La calidad del suelo se ha definido como la condición que éste presenta y que le permite funcionar dentro de los límites de ecosistemas naturales o manejados para mantener la productividad animal y vegetal, mantener o mejorar la calidad del agua y del aire y la salud y el hábitat para los humanos (Karlen y Stott, 1994, Doran y Parkin, 1994). Según Bouma (2002), la capacidad de funcionamiento del suelo depende además de factores climáticos y de manejo y, en consecuencia, este autor considera más apropiado hablar de calidad de tierra y no de calidad de suelo. Otros, como Doran (2001) y Acton y Gregorich (1995), utilizan el término salud del suelo como un equivalente al de calidad, sin embargo, Karlen et al. (1997) plantean que son conceptos diferentes.

En esta investigación tierra se define como una extensión delimitable de la superficie terrestre que contiene los elementos del ambiente biofísico y socioeconómico que influyen en el uso. Incluye el suelo, la forma del terreno, el clima, la hidrología, la vegetación, la fauna, los efectos del uso y las actividades humanas; todo esto mediante su relación con el uso actual o con la aptitud de uso (FAO, 1976 y 1995). En este concepto, el suelo es uno de los componentes de la tierra, pero también se consideran otros, sus características y sus interacciones. El concepto tierra es más amplio, permite una evalua-

ción más integral, lo que es muy apropiado ya que la aptitud para un tipo de uso depende de factores biofísicos, pero también, de variables sociales, económicas y ambientales que pueden ser determinantes en el éxito o fracaso de un tipo de uso.

Para evaluar la calidad de las tierras se trabaja en el desarrollo de métodos apropiados y en la definición de indicadores básicos de calidad (Bouma, 2002), con el fin mejorar lo que generalmente ha sido un proceso intuitivo y no cuantificable (Pierce y Larson, 1993). La comparación de diversos indicadores, sin un esquema que permita establecer la importancia relativa de cada uno y su desempeño en condiciones específicas de un sitio, puede ser complicado; por lo tanto, se considera que es más eficiente utilizar modelos basados en la recolección de datos que sintetizan un número adecuado de indicadores (Harris et al., 1996). Dichos modelos pueden basarse en procesos o modelos funcionales, como los índices de productividad (Larson y Pierce, 1994), los índices de calidad del suelo (Doran y Parkin, 1994), las funciones de ponderación (Karlen y Stott, 1994) y los modelos basados en lógica difusa (Harris et al., 1996).

Uno de los factores limitantes básicos para la aplicación de cualquier método de evaluación de la calidad de tierras es la disponibilidad y calidad de los datos existentes. Los modelos más completos exigen bastantes datos y con alto nivel de detalle, de manera que se puedan hacer análisis cuantitativos de los indicadores y de su relación con la producción. En Colombia, la disponibilidad de datos de suelos, clima, uso y cobertura, actualizados y a nivel detallado, sólo cubre una extensión mínima del territorio; por lo tanto, se requiere el desarrollo de modelos apropiados a las condiciones del país.

En la actualidad, las tecnologías de la información geográfica, como son las imágenes de satélite, los sistemas de posicionamiento global (GPS) y los sistemas de información geográfica (SIG), junto con los avances en los métodos de análisis espacial, surgen como alternativas importantes para diversos estudios de los recursos naturales. En tal sentido, se planteó esta investigación con el objeto de desarrollar un modelo que integre las tecnologías de la información geográfica con los datos de campo con el fin de evaluar la calidad de las tierras de ladera dedicadas principalmente al cultivo de papa y orientar su uso y manejo de manera que se mejore la sostenibilidad del cultivo.



de satélite SPOT, se identificaron los principales factores y procesos que inciden en la calidad de las tierras, estableciendo las relaciones causa-efecto.

### Diseño y desarrollo del modelo

En esta etapa se seleccionaron los indicadores de calidad de tierras, se definieron los métodos de análisis y se diseñó y desarrolló el modelo. También, se recolectaron los datos y se implementó la base de datos.

### Selección de los indicadores de calidad de tierras

El USDA (siglas en inglés de United States Department of Agriculture) define los indicadores como aquellas propiedades físicas, químicas o biológicas o los procesos que pueden ser medidos para monitorear los cambios en el suelo o en las tierras. Los indicadores se seleccionan con base en: el tipo de uso o función que se evalúa, la facilidad de medición o estimación, la confiabilidad, la variación en el tiempo y en el espacio, la sensibilidad del indicador ante efectos del uso y del manejo, la compatibilidad con los análisis de rutina y la facilidad para interpretarlo (USDA, 2001).

Para la selección y prueba de los indicadores, se escogió una zona piloto de aproximadamente 6.800 ha que corresponde a la parte alta de la cuenca del río Frío, en jurisdicción de los municipios de Zipaquirá y Cogua (Cundinamarca). Allí se realizó un estudio detallado, a escala 1:25.000, con el fin de conocer la distribución espacial de los suelos, sus características y evaluar el impacto del cultivo de la papa en las propiedades del suelo (Ávila, 2005). Este enfoque permite seleccionar los indicadores más apropiados, expresados como características que varían a través del tiempo y del espacio por efecto del uso (Martínez y Zinck, 2004). También, en una de las unidades de suelo encontradas, se seleccionó un lote de 1,25 ha cultivado en papa y allí, mediante un estudio muy detallado (a nivel de lote), se efectuó un modelamiento de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y de su relación con la producción del cultivo, con base en análisis geoestadístico (Muñoz, 2005).

Posteriormente, se efectuó un análisis de las características de dichos indicadores y de su aplicabilidad según la escala del estudio y la disponibilidad de datos. Para establecer los requerimientos del cultivo de papa, se revisaron los resultados de investigaciones efectuadas en diversas regiones del país, al igual que las recomendaciones generales que se han difundido sobre el manejo del cultivo.

### Recolección y sistematización de los datos

La unidad espacial de análisis fue la unidad de tierra, definida por la FAO (1976, 1995 y 1997) como una extensión de la superficie terrestre que presenta unas características y cualidades específicas, que pueden demarcarse en un mapa y que tiene un significado importante desde el punto de vista del uso y manejo. Se partió de las unidades de suelo definidas en el estudio de suelos de Cundinamarca (IGAC, 2000) y se extractaron los datos de litología y suelos. Se complementaron con trabajo de campo realizado con el fin de establecer la representatividad de las unidades de suelo y de los datos correspondientes a los perfiles modales descritos en el estudio.

Se utilizó un modelo digital de elevación (DEM) con resolución de 30 m, suministrado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, para los análisis de relieve, cálculo del grado de la pendiente y dirección flujo. Para conocer el uso y la cobertura, en especial la ubicación de los cultivos de papa, se utilizó una imagen de satélite SPOT de julio de 2003 (Riaño, 2005). La clasificación se verificó con base en puntos de muestreo descritos en campo, sobre los que se reconstruyó su historia de uso a través de información de los agricultores.

Se colectaron y procesaron datos de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Se utilizaron los datos del Censo Nacional de la Papa (Dane, 2003) y se revisaron algunos estudios adicionales sobre las características de los sistemas de producción.

Para el almacenamiento y manejo de los datos se diseñó una base de datos utilizando el software Arc-Gis versión 9.1.

### Análisis de los datos

En una primera etapa se efectuaron los análisis para obtener cada uno de los indicadores en forma separada, obteniéndose un mapa que muestra el estado del indicador para toda el área de estudio. Con la aplicación de la lógica difusa, cada indicador se califica en grados de pertenencia y finalmente se integran todos los indicadores con base en la fórmula de la ecuación 4 para obtener la clasificación final de las tierras según su calidad. La lógica booleana se basa en proposiciones totalmente verdaderas o totalmente falsas, mientras que

la lógica difusa permite obtener valores intermedios según su grado de veracidad. En este trabajo, los grados de pertenencia varían entre 0 (totalmente falso) y 1 (totalmente verdadero). La estimación de los indicadores se realizó así:

### Condiciones para la mecanización

Se estimó con base en la pendiente del terreno calculada a partir del DEM. El grado de pertenencia se calculó mediante la expresión:

$$y = \begin{cases} 1 - 0,0125x & 0 \leq x \leq 75 \\ 0,06 & x > 75 \end{cases}$$

Donde, x es el grado de pendiente en porcentaje y el grado de pertenencia es y. Aunque la profundidad efectiva del suelo influye también en las condiciones de mecanización, esta característica se involucró posteriormente cuando se estimaron las condiciones de enraizamiento.

### Disponibilidad de agua

Este indicador busca evaluar la cantidad de agua disponible para el cultivo durante el ciclo para su buen desarrollo. Para determinarlo se utilizó el régimen de humedad del suelo, que está definido en términos de la presencia o ausencia de agua retenida a menos de 1.500 kPa y es un indicador de la disponibilidad de agua para el cultivo. El grado de pertenencia se calificó según lo expresado en la tabla 1.

Tabla 1. Escala de calificación del régimen de humedad de un suelo para estimar la disponibilidad de agua en él.

Régimen de humedad del suelo	Calificación
Acuico	0,1
Ústico	0,7
Údico	1
Xérico	0,6

### Condiciones para el enraizamiento

Se refiere a las condiciones del suelo que permiten un buen crecimiento y desarrollo de las raíces en profundidad, garantizando que los estolones y los tubérculos no tengan obstrucción para su crecimiento y tengan una buena formación. Este indicador se evaluó con la profundidad efectiva del suelo, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Escala de calificación de la profundidad de un suelo para estimar las condiciones de enraizamiento.

Profundidad del suelo	Rango (cm)	Calificación
Extremadamente superficial	< 10	0
Muy superficial	10 – 25	0,1
Superficial	25 – 50	0,3
Moderadamente profundo	50 – 100	0,8
Profundo	100 – 150	1
Muy profundo	150	1

La papa presenta un sistema radicular muy ramificado y con innumerables raicillas que pueden llegar a los 90 cm de profundidad y 40 cm de cobertura horizontal. Por ello, para que este sistema radical se desarrolle adecuadamente se requiere un suelo profundo. Delgado (1981) encontró un efecto positivo de la profundidad efectiva en el rendimiento del cultivo. En el área de estudio se encuentran restricciones de la profundidad, principalmente por presencia de roca o pedregosidad dentro del perfil de suelo. Se consideró como límite inferior 25 cm de profundidad y como límite superior, 50 cm, lo que indica que por debajo de dicho límite no es recomendable establecer cultivos

### Drenaje

El drenaje natural es un indicador importante de la calidad de las tierras para papa por su relación con la disponibilidad de oxígeno. La deficiencia de oxígeno puede ser uno de los factores más limitantes en la producción del cultivo de papa, ya que causa un retardo en la emergencia de las plántulas, reduce los rendimientos y, en la mayoría de los casos, es responsable de las malformaciones del tubérculo (Ruiz, 1986). La calificación de este indicador se muestra en la tabla 3.

### Riesgo a la erosión

Con el fin de evaluar la susceptibilidad del área de estudio a la erosión, se desarrolló un modelo basado en

Tabla 3. Escala de calificación del drenaje de un suelo.

Clase	Calificación
Muy pobre	0
Pobre	0,3
Moderado	0,6
Bueno	0,75
Excesivo	1

la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), modificando la forma como se calculan algunos parámetros (figura 2). La USLE permite estimar la pérdida de suelo con base en la ecuación:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde  $E$  es la pérdida de suelo en  $t \cdot ha^{-1}$  anuales,  $k$  representa la erodabilidad del suelo,  $L$  y  $S$  se refieren al efecto de la longitud y el grado de la pendiente,  $c$  representa el efecto de la cobertura y  $p$ , el de las prácticas de manejo y conservación.

Estos parámetros se desarrollaron originalmente para nivel de lote cultivado, pero se han aplicado a áreas mayores, como cuencas o regiones (Merritt et al. 2003), con diversas modificaciones en el cálculo de algunos parámetros, para lo cual los SIG son un apoyo importante (Wilson y Lorang, 2001). El efecto del relieve se calculó con base en el método propuesto por Moore y Burch (1986), que considera el grado de la pendiente y la dirección de flujo. El efecto del suelo ( $k$ ) se obtuvo a partir de las características de suelo, con base en el mapa de suelos escala 1:100.000 y los valores para los perfiles representativos, de acuerdo a su ubicación en el paisaje. El efecto de la lluvia, generalmente referido a la relación existente entre intensidad de la lluvia y su energía cinética, tiene varias aproximaciones de cálculo: el original

de la USLE implica tener pluviogramas para realizar cálculos a intervalos de tiempo dentro de un aguacero, sin embargo, pocas estaciones disponen de dichos registros y en donde se encuentran están incompletos; por ello, se estableció la distribución espacial de la lluvia, a partir de los datos de 20 estaciones del área de estudio, efectuando análisis de interpolación por el método de la distancia inversa ponderada (Chang, 2004) y luego, se efectuó un estimativo de un índice de erosividad de la lluvia, basado en la modificación del índice de Fournier (IMF) propuesto por la FAO (Lal, 1988):

$$\sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde  $P_i$  es la cantidad de lluvia en un mes dado ( $i$ ) y  $P$  es la lluvia anual.

Este índice anual se considera que correlaciona adecuadamente con el índice  $EI_{30}(R)$  de la USLE mediante una ecuación del tipo  $R = b + a$  (IMF) (Lal, 1988). En este trabajo no se obtuvieron los valores  $b$  y  $a$  por falta de datos y, por consiguiente, no se calcula la pérdida de suelo en la ecuación final, en cambio, se hace un estimativo de la susceptibilidad a la erosión.

El efecto de la cobertura sobre la erosión se estableció transformando el mapa de uso y cobertura que se obtuvo con la imagen SPOT en el índice  $c$  de la cobertura. Los valores del índice para los cultivos de papa y las demás coberturas se obtuvieron a partir de las investigaciones de Gabriel et al. (2003).

$P$  (ver ecuación 2) es el factor para las prácticas de conservación, una relación entre la pérdida de suelo de un campo sin prácticas de conservación con otro campo con prácticas de conservación. En este modelo no se consideró este factor porque, a pesar de que existen recomendaciones y prácticas de conservación desarrolladas por diferentes entidades, su uso no está generalizado.

Con el fin de conocer las condiciones de campo del proceso erosivo, se seleccionaron sitios cultivados en papa en diferentes posiciones fisiográficas y en cada uno se efectuó una descripción detallada del suelo mediante cajuelas. Se establecieron los horizontes existen-

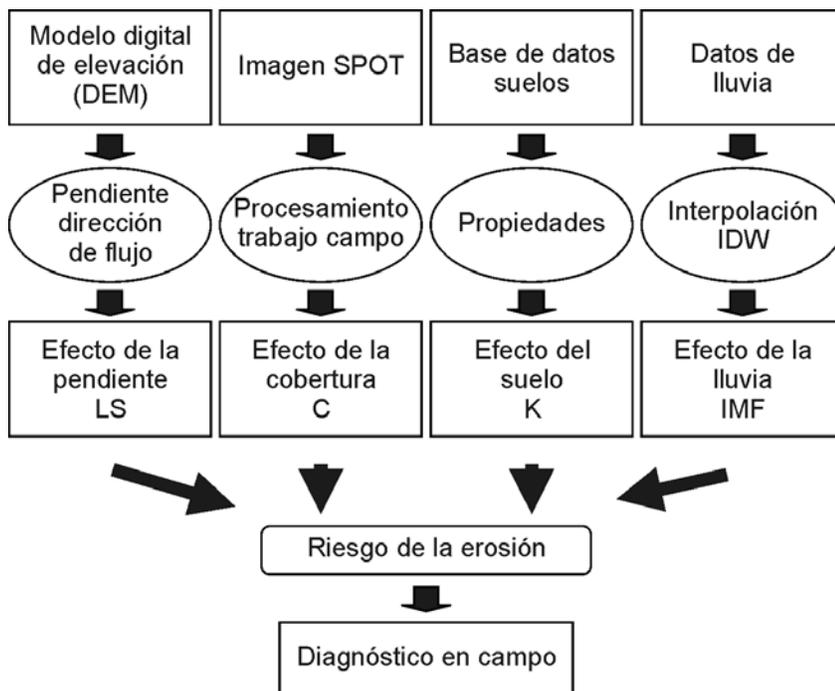


Figura 2. Evaluación de la susceptibilidad a la erosión.

tes, se les midió el espesor y se hicieron los análisis físico-químicos. A través del análisis comparativo se estimó la posible pérdida de suelo, según el método propuesto por la FAO (1997b).

### Clasificación de las tierras según su calidad

Los indicadores establecidos se integraron mediante un análisis espacial basado en la aplicación de lógica difusa, con la fórmula:

$$AND(t) = \min(t) + [\text{promedio}(t) - \min(t)] \cdot [\min(t)+1]/2$$

(ecuación 4)

Donde  $AND(t)$  es el valor de veracidad de un operador  $AND$ ,  $\min(t)$  es el valor mínimo de veracidad de alguno de los antecedentes del operador  $AND$  y el promedio( $t$ ) es la media ponderada de los valores de veracidad de los antecedentes del operador  $AND$ . Según Reynolds (2001), esta ecuación produce una estimación cautelosa del grado de veracidad, siendo apropiada para la evaluación de factores limitantes o excluyentes como los que se utilizan en este modelo.

### Implementación y aplicación del modelo

Se efectuó el desarrollo del modelo a través del módulo Model builder de ArcGis 9.1 (ESRI, 2004), que permite integrar diferentes procesos de análisis en forma automatizada, obteniendo el producto deseado, en este caso, la clasificación de las tierras según su calidad.

### Evaluación del modelo

Luego de desarrollado el modelo, se aplicó a la zona piloto y se le efectuaron diversos ajustes. Inicialmente, se compararon unidades de tierra con características similares y también, unidades muy diferentes para analizar el comportamiento del modelo. Efectuados los ajustes, se aplicó el modelo a toda el área de estudio, se imprimieron los resultados y se realizó una verificación en campo para conocer la consistencia y confiabilidad de los resultados.

## Resultados y discusión

### Enfoque conceptual

En la figura 3 se muestra el enfoque conceptual utilizado para evaluar la calidad de las tierras. La base de la evaluación consiste en un análisis comparativo entre los valores de los indicadores en cada una de las unidades

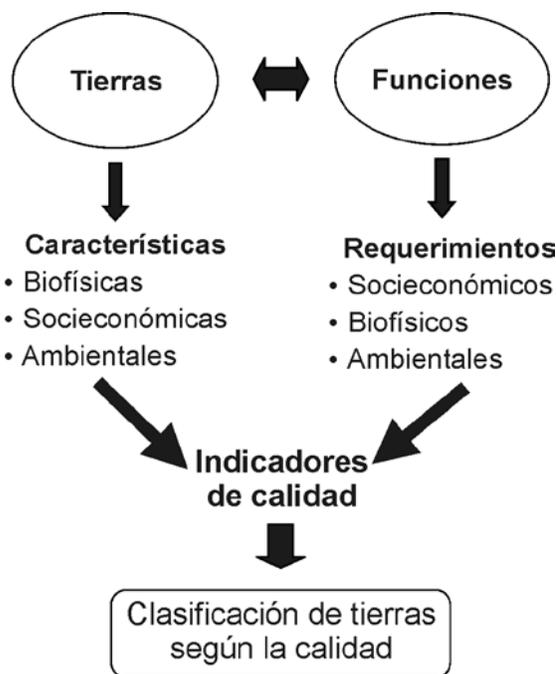


Figura 3. Evaluación de la calidad de las tierras.

de tierra y los requerimientos que cada función necesita para un desempeño adecuado. El proceso implica identificar las funciones de las tierras –en este caso la producción de papa–, caracterizar y establecer las condiciones apropiadas y las limitaciones para el desempeño. Por otra parte, se requiere definir espacialmente las unidades de tierra y sus características.

La evaluación de la calidad de las tierras implica conocer el estado actual de las tierras y compararlo con valores conocidos o deseados; en este caso, la comparación se efectuó con relación a los requerimientos que se consideran apropiados para el cultivo. Un aspecto importante que requiere mayor investigación es el referente a los requerimientos del cultivo, ya que la definición de niveles óptimos y niveles limitantes para los diferentes indicadores de calidad no se encuentra muy bien definida. Según la revisión efectuada, la mayor parte de las investigaciones se han centrado en definir algunos requerimientos de fertilizantes (N, P, K) y muy poco se ha investigado la función de otras propiedades del suelo, como es el caso de las físicas, como se encontró en la zona de estudio son las que más cambio presentan por efecto del uso (Ávila, 2006).

### Indicadores de calidad de las tierras

Con base en las características de los datos disponibles y considerando los requisitos que debe reunir un in-

dicador, se seleccionaron los siguientes indicadores de calidad de las tierras: la erosión del suelo, ya que es el principal proceso que afecta la calidad de las tierras en la zona estudiada; es un indicador que se puede monitorear a través del tiempo y permite tener una idea de la sostenibilidad ambiental del cultivo. En cuanto a los indicadores agronómicos, se seleccionaron las condiciones de mecanización, el drenaje, el régimen de humedad del suelo y las condiciones de enraizamiento.

De acuerdo con el estudio sobre impacto del uso en las propiedades del suelo (Ávila, 2005), se encontró que otras características son importantes como indicadores, sin embargo, no hacen parte de los análisis que se efectúan para todos los perfiles de los levantamientos de suelos o su representatividad no es adecuada, por la alta variación que presentan o porque dependen en gran medida de la historia de uso y manejo a que haya sido sometido cada lote. Por lo tanto, no se deben considerar como indicadores a nivel regional, ya que producen resultados poco

confiables; ejemplos de esas características son la densidad aparente, la infiltración, la resistencia a la penetración y algunas propiedades químicas, como la saturación de aluminio, el pH y el contenido de bases.

### Riesgo de erosión

La erosión hídrica es el principal proceso que afecta la calidad de las tierras. Como se observa en la figura 7a, más de 60% del área estudiada presenta algún grado de susceptibilidad a la erosión y 36% tiene susceptibilidad de alta a extremadamente alta. Las áreas con grado alto (figura 4) corresponden a las que tienen pendiente fuerte y están siendo cultivadas o pueden ser cultivadas en papa o en otros cultivos que ofrecen poca protección al suelo. Las áreas con grado muy alto y extremadamente alto corresponden a aquellas afectadas por procesos erosivos severos, en donde se ha perdido prácticamente todo el suelo y son muy frágiles ante la intervención humana; algunas están en proceso de recuperación o

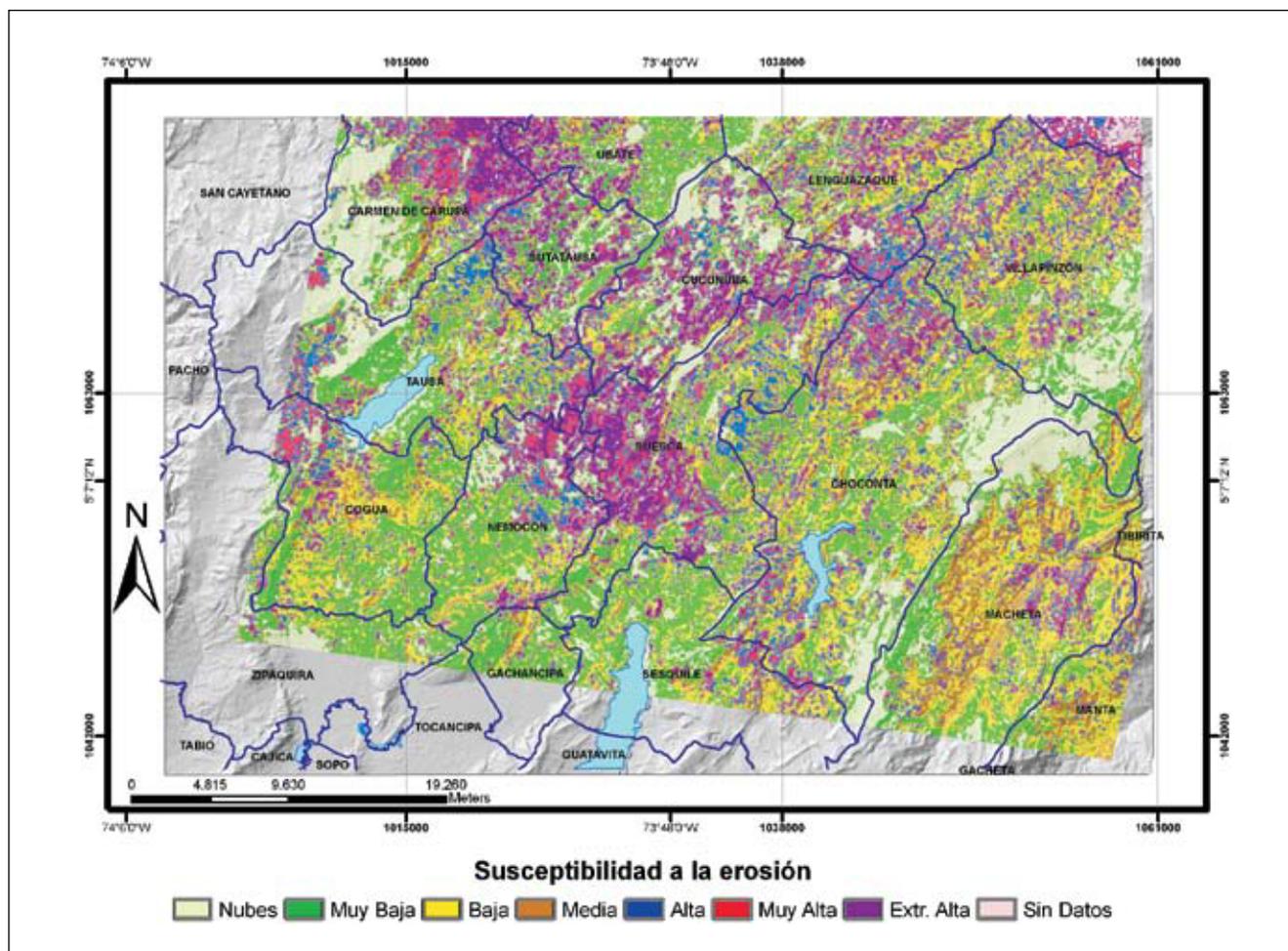


Figura 4. Susceptibilidad a la erosión considerando la cobertura actual.

sin ningún uso, ya que su capacidad productiva se ha disminuido drásticamente. Las áreas de baja susceptibilidad a la erosión son aquellas zonas planas cuyo uso es la ganadería; también se incluyen las áreas de bosque natural o plantado que protegen al suelo de la erosión.

La combinación de los factores que inciden en la erosión permite obtener el mapa de susceptibilidad a este proceso, que, como se dijo atrás, no representa la cantidad de suelo perdido, como generalmente se obtiene con la USLE o con los modelos basados en esta ecuación. En cambio, este mapa muestra valores relativos: los colores rojos representan áreas en avanzado estado de deterioro por la erosión y hacia donde se deben enfocar los planes de recuperación; los colores azules son áreas con susceptibilidad alta que requieren planes de conservación basados principalmente en modificación de los sistemas de la branzay, en algunos casos, en reubicación

de los cultivos de papa; los colores verdes representan aquellas tierras que tienen una susceptibilidad moderada y requieren medidas de conservación de suelos para contrarrestar el avance de la erosión y los colores amarillos son las zonas con menor susceptibilidad a la erosión, bien sea porque son planas o porque actualmente están cubiertas por bosques o por vegetación nativa, y, por lo tanto, los suelos están protegidos del efecto erosivo de las lluvias.

En la figura 5 se presenta el submodelo automatizado elaborado con el módulo Model Builder de ArcGIS 9.1. Con el DEM como fuente de datos, se calculó el efecto del relieve en la erosión. Éste es un aporte importante, ya que las unidades de mapeo de suelos – como se definen en los diferentes estudios – presentan en general dentro de ellas una alta variabilidad espacial de la pendiente, lo que dificulta la determinación de los parámetros re-

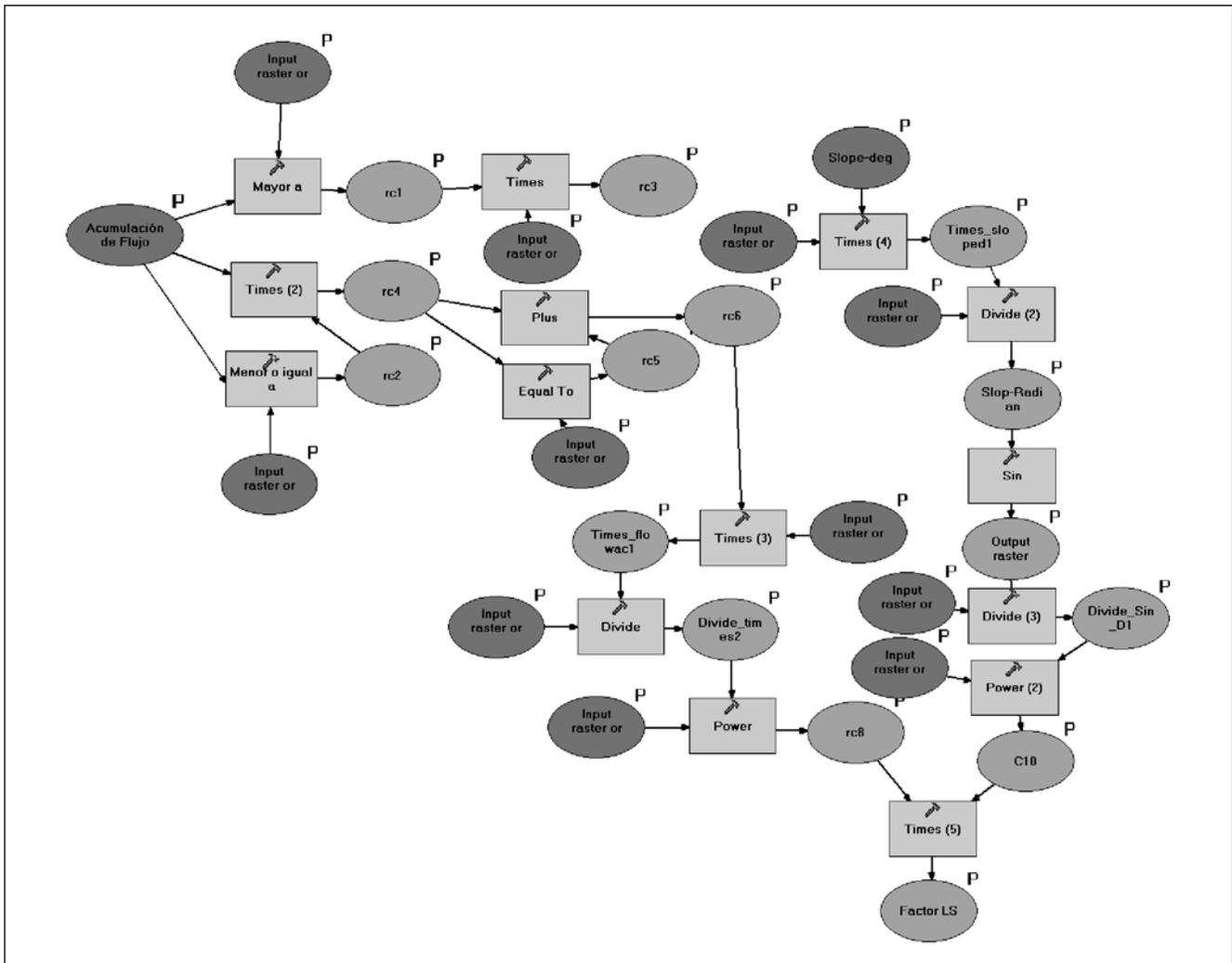


Figura 5. Modelo en ArcBuilder para cálculo del efecto del relieve en la erosión (P: parámetro del modelo).

queridos, afecta la representatividad y origina sobrevaloración o subvaloración de defectos de estos factores. De acuerdo con Warren et al. (2004), los modelos de erosión son muy sensibles a errores en la pendiente, ya que la erosión aumenta en forma exponencial en relación con la pendiente. La clase de pendiente –como se determina en los estudios generales de suelo– no es apropiada para la aplicación de modelos por la gran variabilidad que presenta dentro de las unidades cartográficas.

Es importante señalar que el análisis de la erosión se realizó teniendo en cuenta el uso y la cobertura actual. Esto significa que cuando el uso se cambia, la susceptibilidad a la erosión también lo hace: por ejemplo, si una área está en pastos, la susceptibilidad a la erosión es menor y puede aparecer con colores amarillos, pero si se siembra en papa puede cambiar de clase y pasar a zonas azules, con susceptibilidad más alta.

En referencia al análisis de campo, al comparar los sitios P1A (posición alta de la ladera) con P1B (posición baja de la ladera) y P1C (posición media de la ladera) ubicados dentro de un cultivo de papa (figura 6), el suelo en P1A posee un horizonte superficial (A) muy delgado, de aproximadamente 5 cm, y luego continúa el horizonte c, mientras que en los otros sitios aquel horizonte tiene más de 45 cm. Esto implica que en el sitio P1A se ha perdido prácticamente todo el suelo productivo, que, según el estimativo efectuado, puede equivaler a pérdidas superiores a los 400 kg·m<sup>-2</sup> de suelo, extremadamente altas. Por otra parte, los resultados del análisis en laboratorio indican que sólo los primeros 5 cm presentan condiciones apropiadas para el cultivo, ya que el horizonte siguiente corresponde a una capa de muy baja fertilidad y con contenidos muy altos de arcilla, que constituyen un impedimento para el crecimiento de las raíces. Todo esto afecta el crecimiento y desarrollo del cultivo e incide en una disminución drástica del rendimiento.

Los procesos erosivos observados se explican por la labranza inadecuada que destruye la estructura del suelo y lo deja pulverizado y expuesto para ser transportado por la escorrentía; se en-

contró una erosión alta, incluso en pendientes relativamente suaves (< 25%).

#### Condiciones para la mecanización

Como ya se dijo, este indicador se obtuvo a partir del grado de la pendiente, que, a su vez, fue calculado con base en el DEM. Del mapa obtenido para este indicador y según los datos de la figura 7b, se encontró que 30% del área no tiene limitaciones para la mecanización, correspondiente a las zonas que tienen pendiente inferior a 12%; el 31% presenta grado medio de limitación para la mecanización, con pendientes entre 12% y 37%; otro 29% del área tiene un grado de limitación alto, con pendientes entre 37% y 55%, y finalmente están las áreas cuya pendiente es superior a 55%, que presentan un grado de limitación muy alto para la mecanización y representan 9% de la extensión total estudiada.

#### Disponibilidad de agua

Este indicador se evaluó con base en el régimen de humedad del suelo. Como se observa en la figura 7c, se

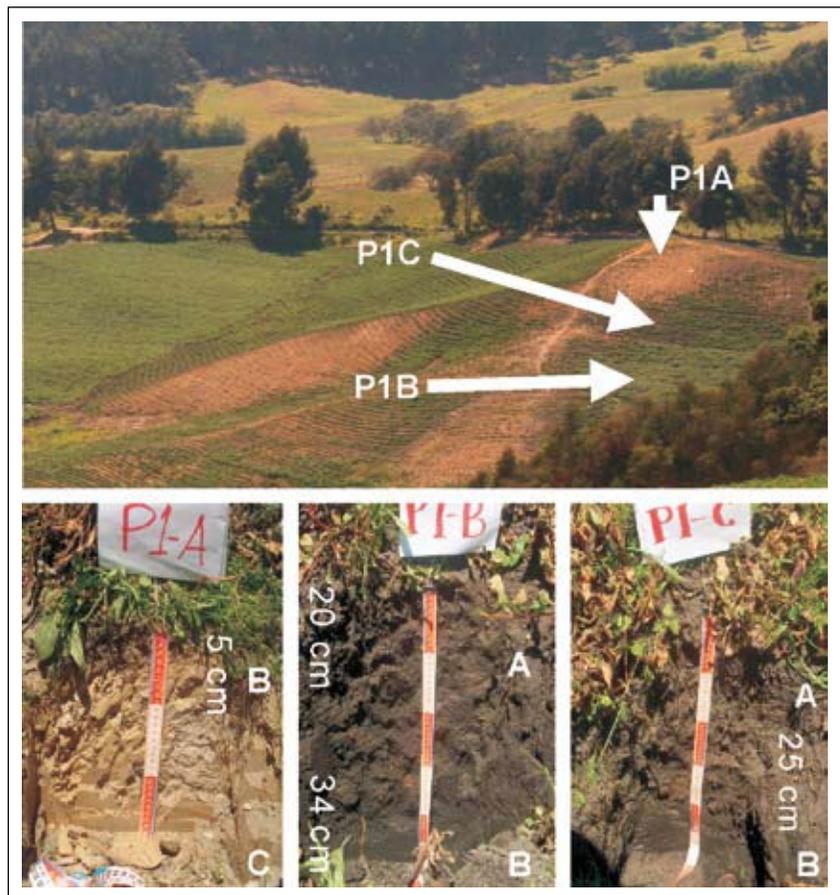


Figura 6. Diagnóstico de la erosión en campo.

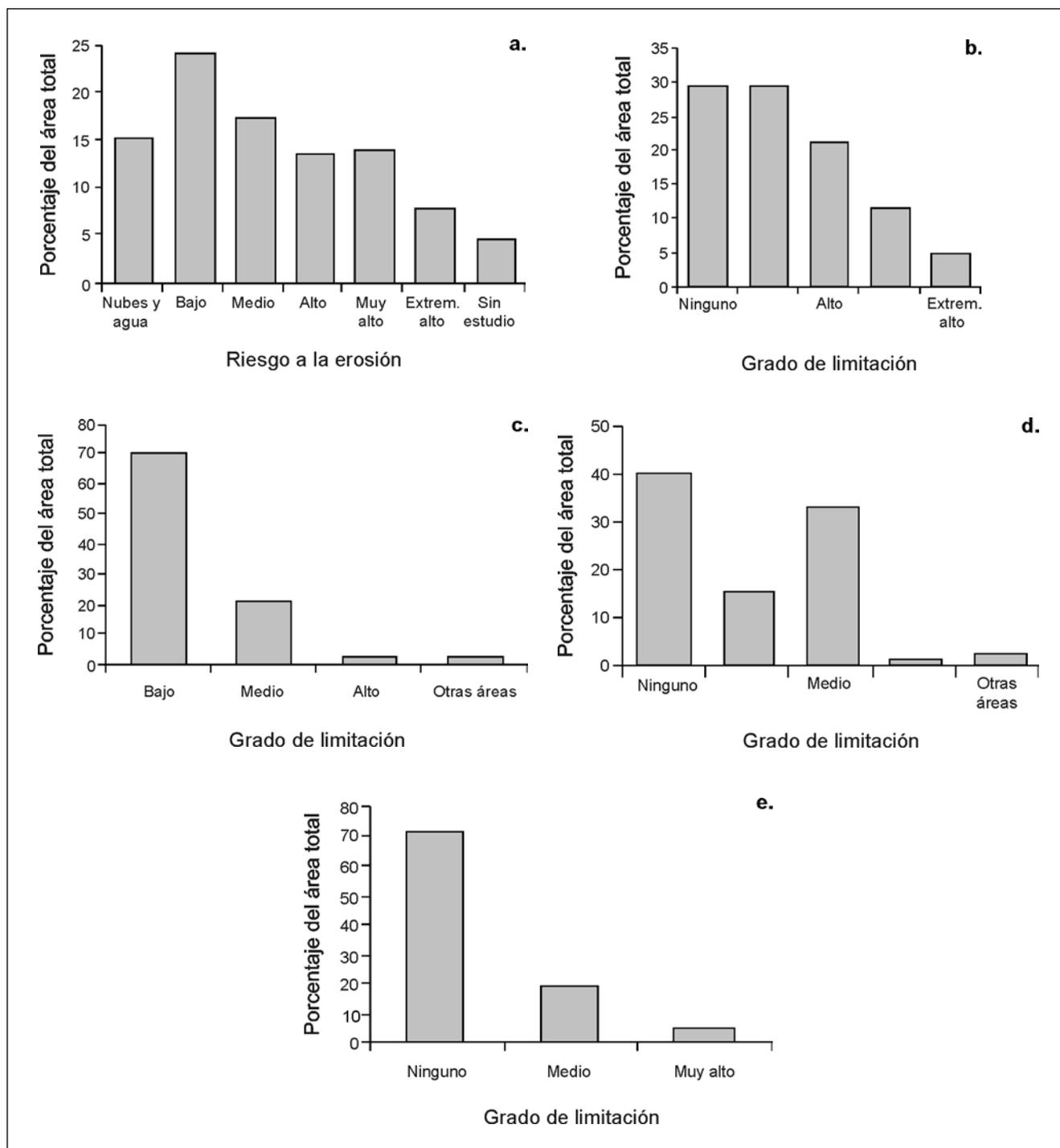


Figura 7. Extensión del área de estudio ocupada por cada uno de los indicadores de calidad de las tierras evaluados según su grado de incidencia: a) riesgo a la erosión, b) condiciones de mecanización, c) disponibilidad de agua, d) condiciones de enraizamiento y e) drenaje.

encontró que, a partir del mapa elaborado, 73% del área de estudio presenta un grado de limitación bajo por disponibilidad de agua y corresponde a las zonas con régimen údico y 21% son áreas con limitación de grado medio correspondientes al régimen ústico.

#### Condiciones para el enraizamiento

En el área de estudio se encuentran restricciones de la profundidad principalmente por presencia de roca o pedregosidad dentro del perfil de suelo. Según la figura

7d, el 44% del área no presenta limitaciones de profundidad del suelo para el cultivo; 17% tiene grado de limitación bajo, o sea, con una profundidad entre 50 y 100 cm; 34% del área tiene grado medio y está representada por aquellos suelos que tienen entre 25 cm y 50 cm de profundidad y finalmente, algunas áreas tienen grado de limitación alto, con suelo de menos de 25 cm de profundidad y ocupan el 2% del área.

### Drenaje

Según la figura 7e, el 75% del área no presenta limitación por este indicador y representa las zonas con drenaje bueno o excesivo; 20% tiene limitación media, o sea, presenta suelos con drenaje moderado, y 5% muestra limitación en grado alto y tiene suelos con drenaje pobre. En el área de estudio, las zonas con limitaciones por drenaje corresponden a las vegas de los ríos y a las formas cóncavas, que propician acumulación del agua dentro del perfil del suelo por períodos prolongados

### Clasificación de las tierras de acuerdo con su calidad

La integración de los indicadores aquí definidos se realizó con base en el operador AND de lógica difusa, según la ecuación 4. En el mapa de la figura 8 se muestra la clasificación de las tierras de acuerdo con su calidad para el cultivo de papa, teniendo en cuenta los indicadores descritos. Una consideración importante en este modelo es que al momento de hacer la clasificación no se incluyeron en él las áreas que actualmente están en bosque, ya que el objetivo era evaluar la calidad de las tierras para el cultivo de papa y se presume que las áreas en bosque se mantendrán con esa cobertura, lo que es recomendable.

Con base en esto, se encontró que 27% del área presenta calidad baja, 30% tiene calidad media y 17%, calidad alta (figura 9). El análisis indica que la erosión es el proceso que más efecto tiene en la calidad de las tierras y, luego, son importantes las condiciones para mecanización, la profundidad del suelo y el drenaje. Por otra

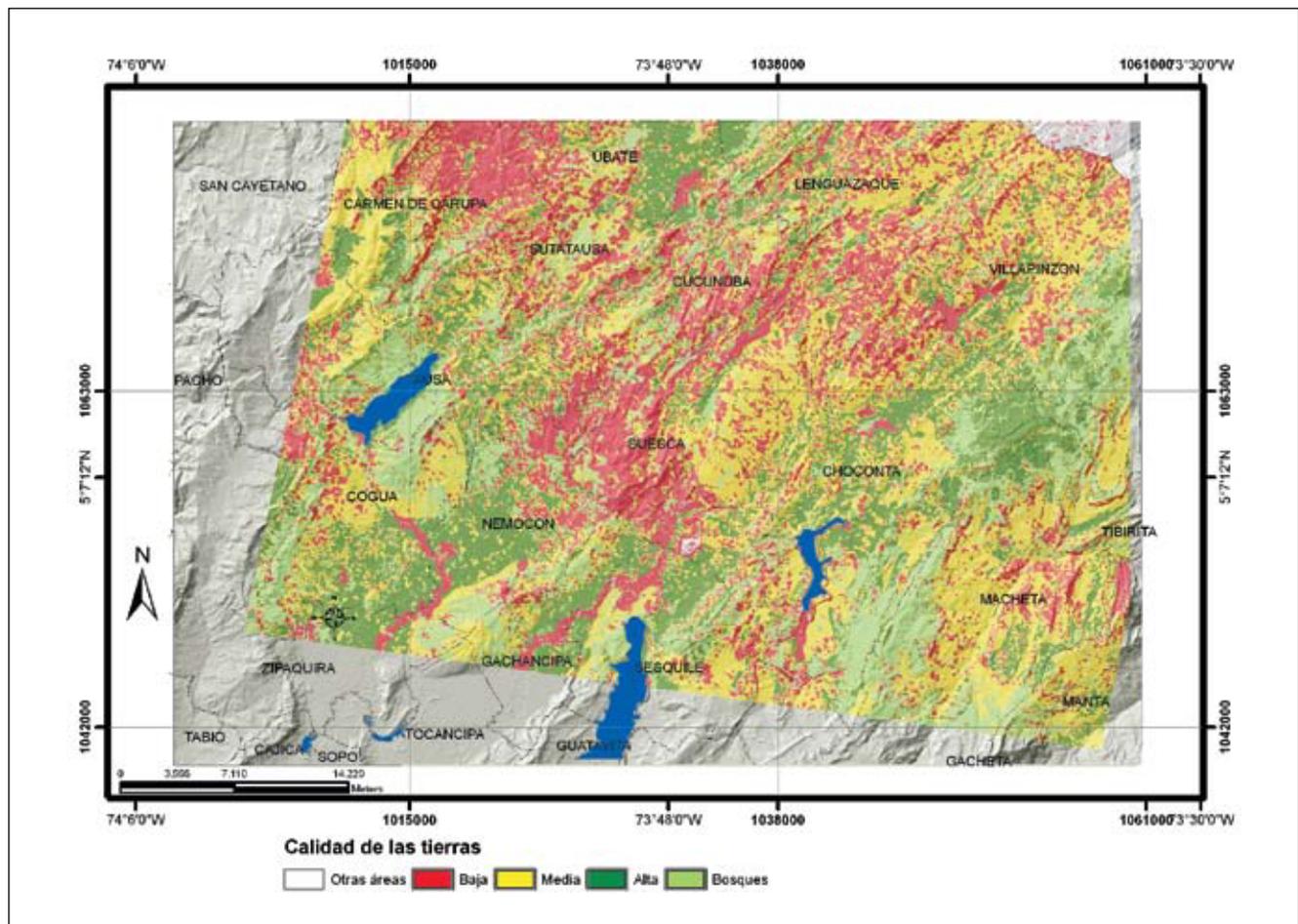


Figura 8. Calidad de las tierras para el cultivo de papa.

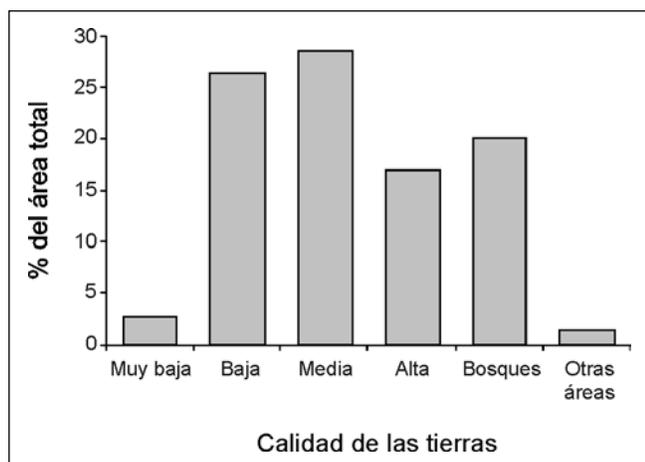


Figura 9. Extensión ocupada por cada clase de calidad de tierras.

parte, cuando se analiza la relación entre la ubicación de los cultivos que había en julio de 2003 –según los datos de la imagen de satélite– y la calidad de las tierras obtenida en el análisis anterior, se encontró que 25% de las áreas cultivadas en ese año se encontraban en tierras de calidad baja, 70% ocupaba tierras de calidad media y el 5% restante, áreas clasificadas como de alta calidad. Es importante considerar que en este modelo las tierras de calidad alta son aquellas planas, con suelos profundos y bien drenados, que actualmente están principalmente dedicadas a la ganadería.

Por otra parte, al analizar las áreas que estaban cultivadas en papa en 2003 con relación a su ubicación según la altitud, se encontró que: 21% de las áreas cultivadas se encontraba en alturas inferiores a 2.800 msnm; un 38%, en alturas entre 2.800 y 3.000 msnm; el 34%, en el rango entre 3.000 y 3.300 msnm y 7% por encima de 3.300 msnm.

#### Datos requeridos y aplicación del modelo

El modelo presentado en este artículo es principalmente útil para estudios regionales (escala general) y, en consecuencia, involucra indicadores de calidad que son útiles para ese nivel de detalle. En el proyecto se definieron otros indicadores aplicables a nivel de finca que permiten mayor nivel de detalle (Ávila, 2005).

Un factor que condiciona el desarrollo de modelos para evaluar la calidad de las tierras es la disponibilidad de datos y su calidad. Con relación al clima, se encontraron 20 estaciones con datos de lluvia, registrados principalmente por pluviómetros. Su característica

principal es la gran cantidad de datos faltantes, por lo que se procedió a seleccionar de cada estación los años con datos completos, lo que genera cierta dificultad al momento de interpretar los resultados ya que no corresponden al mismo número de años. Por otra parte, la falta de registros en pluviogramas impidió hacer análisis detallados de la erosividad de la lluvia (factor  $R$  de la USLE), que implica cálculos de intensidades de la lluvia para períodos específicos dentro de cada aguacero.

Con relación a los suelos, el estudio de Cundinamarca (IGAC, 2000) presenta las unidades de suelos ubicadas espacialmente, los perfiles modales con su descripción morfológica y las características químicas de cada perfil modal. Como se observó en el estudio de variabilidad espacial de las propiedades del suelo (Muñoz, 2005), éstas presentan una alta variabilidad en distancias cortas, lo que implica que las unidades de suelos representadas en el mapa a escala 1:100.000 resultan ser muy heterogéneas para los propósitos del modelo, dificultando el uso de los indicadores de calidad de tierras determinados. Por otra parte, el estudio de impacto del uso en las propiedades del suelo (Ávila, 2005) y los análisis de verificación que se efectuaron en diferentes áreas, indican que características del suelo, como las relacionadas con la compactación y con la fertilidad del suelo, son modificadas por el uso y el manejo, y esto implica que dentro de una unidad de suelos se puede encontrar resultados diferentes dependiendo de la historia de uso y manejo de cada lote. Lo anterior demuestra que los datos correspondientes a dichas características que se encuentran en el estudio de suelo para cada perfil modal, pueden no ser representativos de las propiedades actuales de los suelos. En consecuencia, fue necesario seleccionar aquellas que puedan ser estimadas con mayor confiabilidad, las que se presentan más adelante.

La pendiente es uno de los factores que mayor incidencia tiene en los procesos erosivos y también es básica para definir las condiciones de mecanización del área. Por esto, se requiere una estimación confiable del grado de pendiente y de la dirección de flujo para poderla incluir dentro del modelo. Esta característica se presenta en el estudio de suelos como una clase para las unidades de mapeo; sin embargo, corresponde a un estimativo aproximado de lo que se cree es la pendiente dominante en cada unidad de suelos. En el trabajo de campo se midió la pendiente en diversas partes dentro de la misma unidad de suelos y se encontró gran variación, incluso, por fuera de los límites de las clases establecidas. Con base en esto, se procedió a

remover la clase de pendiente de la unidad de suelos y se calculó a partir del DEM, lo que adicionalmente permite el cálculo de la dirección de flujo.

## Conclusiones

Para la evaluación a nivel general de la calidad de las tierras, es básico contar con fuentes de datos adicionales (imágenes de sensores remotos, DEM, GPS), ya que la información existente en los estudios de suelos no es suficiente. Por una parte, las unidades de mapeo son muy heterogéneas y presentan un alta variabilidad espacial dentro de ellas y por otra, el uso y el manejo hacen variar las propiedades del suelo, lo que implica que la representatividad de varios análisis físicos y químicos que se efectúan en los perfiles modales no es apropiada para los modelos de evaluación de la calidad de las tierras.

Como indicadores se deben seleccionar aquellos que puedan estimarse con mayor confiabilidad y que tengan mayor incidencia en la calidad de las tierras. En este trabajo se hizo énfasis en la erosión, ya que es el proceso que más afecta la calidad de las tierras y al que se debe poner mayor atención, ya que su incidencia será decisiva en la competitividad y la sostenibilidad del cultivo. Igualmente, se evaluó la disponibilidad de agua, las condiciones de enraizamiento, las condiciones para la mecanización y el drenaje del suelo.

La aplicación de la lógica difusa para establecer clases de calidad de tierras es un enfoque importante, ya que la mayoría de los datos que se utilizan tiene un alto nivel de incertidumbre y permite definir clases que presentan límites difusos, contrario a los límites estrictos que se obtienen cuando se aplican los conceptos de lógica booleana. Diversos autores (McBratney et al., 1997; Burrough, 1989) han presentado las bondades de la lógica difusa en estudios de recursos naturales.

El modelo desarrollado permite tomar decisiones sobre la ubicación actual de los cultivos y su relación con las condiciones biofísicas y ambientales. Se pueden establecer los factores limitantes en cada caso y los procesos de deterioro de las tierras con el fin de aplicar medidas correctivas. Por otra parte, este modelo puede ser adaptado para evaluar otros cultivos y ser aplicado a otras zonas.

## Agradecimientos

El presente artículo es parte del proyecto "Modelo para evaluar la calidad de las tierras dedicadas al cultivo de

papa", cofinanciado por el Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena), el Instituto Colombiano de para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas (Colciencias) y la Universidad Nacional de Colombia. Se agradece el apoyo financiero de estas instituciones.

## Literatura citada

- Acton, D.F. y L.J. Gregorich (eds.). 1995. The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa.
- Ávila, E. 2005. Determinación de indicadores para evaluar la calidad de suelos dedicados al cultivo de papa. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Bouma, J. 2002. Land quality indicators of sustainable land management across scales. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88, 129-136.
- Burrough, P.A. 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of Soil Science* 40, 477-492.
- Chang, K. 2004. Introduction to geographic information system. Mc Graw Hill, 400p.
- Departamento Nacional de Estadística (Dane). 2003. Censo nacional de la papa. Departamento Nacional de Estadística (Dane) y Federación Colombiana de Productores de Papa (Fedepapa).
- Delgado, P. 1981. Evaluación agro-económica de los factores que afectan la producción de papa en el distrito de Duitama (Boyacá). Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Doran, J. y A. Jones (eds.). 1996. Methods for assessing soil quality. Special Publication #49. Soil Science Society of America (SSA), Madison, WI.
- Doran, J.W., D.C. Molina y R.F. Stewart (eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Special Publication #35. Soil Science Society of America (SSA), Madison, WI.
- Doran, J. y T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. pp. 3-21. En: Doran, J.W., D.C. Coleman, D.F. Bezdicek y B.A. Stewart (eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Special Publication #35. Soil Science Society of America (SSA), Madison, WI.
- Doran, J.W. 2001. Soil health and global sustainability: translating science in practice. *Agric. Ecosystems Environ.* 88, 119-127.
- ESRI, 2004. Geoprocessing in Arc-GIS. 363p.
- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación], 1976. A framework for land evaluation. Soil resources development and conservation service, Land and water development division. Rome. 72 p.
- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación], 1997a. Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development. FAO, Rome.
- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación], 1997b. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía. Boletín de suelos de la FAO # 68. FAO, Roma. 70p.
- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación], 1995. Planning for sustainable use of land resources: towards a new approach. FAO Land and water bulletin 2. FAO, Rome. 60p.
- Gabriels, D., G. Ghekiere, W. Schiettecatte e I. Rottiers. 2003. Assessment of USLE cover-management C-factors for 40 crop ro-

- tation systems on arable farms in the Kemmelbeek watershed, Belgium. *Soil and Tillage Research* 74, 47-53
- Harris, R.F., D.L. Karlen y D.J. Mulla. 1996. A conceptual framework for assessment and management of soil quality and soil health. pp. 61-82. En: Doran, J.W. y A.J. Jones (eds.). *Methods for assessing soil quality. Special Publication #49. Soil Science Society of America (SSSA), Madison, WI.*
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2000. Estudio de suelos y zonificación de tierras de Cundinamarca. Vols. I-III y mapas.
- Karlen, D. y D. Stott. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. En: Doran, J.W., D.C. Molina y R.F. Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment. Special Publication #35. Soil Science Society of America (SSSA), Madison, WI.*
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris y G.E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Am. J.* 61, 4-10.
- Lal, R. 1988. Erodibility and erosivity. pp. 141-160. En: Lal, R. (ed.). *Erosion research methods. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA.*
- Larson, W. y Pierce, F. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. pp. 37-51. En: Doran, J.W., D.C. Coleman, D.F. Bezdicek y B.A. Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment. Special Publication #35. Soil Science Society of America (SSSA), Madison, WI.*
- Martínez, L.J. y J.A. Zinck. 2004. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil and Tillage Research* 75, 3-17
- McBratney, A. e I. Odeh. 1997. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma* 77, 85-113
- Merritt, W.S., R.A. Letcher y A.J. Jakeman. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software* 18, 761-799
- Moore, I.D. y G. Burch, 1986. Physical basis of the length-slope factor in the Universal soil loss equation. *Soil Sci. Am. J.* 50, 1294-1298.
- Muñoz, J.D. 1995. Modelación del comportamiento espacial de variables edáficas y agronómicas en un cultivo de papa en Zipaquirá. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 93p.
- Pierce, F y W. Larson. 1993. Developing criteria to evaluate sustainable land management. pp. 7-14. En: *Proceedings Soil workshop: Utilization of soil survey information for sustainable land use. Oregon.*
- Reynolds, K. 2001. NetWeaver: a knowledge-based development system. United States Department of Agriculture (USDA) - Forest Service. 75p.
- Riaño, O. 2005. Evaluación de las imágenes de satélite para determinación de indicadores de calidad de tierras dedicadas al cultivo de papa. Informe técnico del proyecto "Modelo para evaluar la calidad de las tierras dedicadas al cultivo de papa". Universidad Nacional de Colombia. pp. 301-358.
- Ruiz, N. 1986. Determinación del tiempo de drenaje para la papa (*Solanum tuberosum*) variedad 'Parda Pastusa' en un suelo de la Sabana de Bogotá. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 150p.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2001. Guidelines for soil quality assessment in conservation planning. Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute. 48p.
- Warren S.D., M.G. Hohmann, K. Auerswald y H. Mitasova. 2004. An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data. *Catena* 58, 215-233
- Wilson, J. y M. Lorang. 1999. Spatial models of erosion and Gis. pp. 83-108. En: Fotheringham, A.S. y M. Wegener (eds.). *Spatial models and Gis: new potential and new models.* Taylor and Francis, London.