



HERRAMIENTAS CONCEPTUALES Y TECNOLÓGICAS PARA LA EVALUACIÓN DE CALIDAD INHERENTE DEL SUELO Y LA IMPLEMENTACIÓN DE PAISAJES PRODUCTIVOS MULTIFUNCIONALES EN EL TRÓPICO

Conceptual and technological tools for the evaluation of inherent soil quality and the implementation of multifunctional productive landscapes in the tropical

Franco Humberto Obando Moncayo¹

RESUMEN

Se presenta una propuesta de clasificación de tierras por capacidad funcional ecosistémica (CTCF) como herramienta de evaluación sitio específico de la calidad inherente del suelo y la implementación del modelo de paisaje productivo multifuncional. Se resalta la importancia de los levantamientos detallados de suelos tecnológicamente basados, con enfoque geomorfológico-pedológico, en la implementación del modelo de paisaje productivo multifuncional en condiciones tropicales, soportado en la comprensión de la variabilidad espacial de los suelos y los procesos dinámicos actuales de entradas y salidas, desde y hacia los paisajes productivos y los recursos naturales circundantes: bosques de galería, humedales, corredores biológicos. Este modelo implica el reconocimiento del suelo como un sistema abierto, variable espacial y temporalmente, que satisface múltiples funciones en los ecosistemas naturales y agroecosistemas. El sistema CTCF resulta de la combinación del sistema FCC (del inglés Fertility Capability Soil Classification) y el sistema de clasificación de tierras por capacidad de uso, LCC (del inglés Land Capability Classification) de amplio uso en el trópico. El sistema CTCF se enfoca hacia la agrupación de unidades cartográficas de suelos con similitud en la capacidad para ejecutar funciones ecosistémicas.

ABSTRACT

A proposal for land classification by Ecosystem Functional Capacity (CTCF) as a tool for site specific assessment of soil inherent quality and the implementation of a multifunctional productive landscape model is presented. The importance of technologically based detailed soil surveys with geomorphological-pedological approach is emphasized in the implementation of the multifunctional productive landscape model in tropical conditions supported by the understanding of the spatial variability of soils and the current dynamic processes of inputs and outputs, to and from productive landscapes and surrounding natural resources such as gallery forests, wetlands, and biological corridors. This approach implies recognition of soil as an open system, spatially and temporally variable, which satisfies multiple functions in natural ecosystems and agroecosystems. The CTCF system results from the combination of the Fertility Capability Soil Classification (FCC) system and the Land Capability Classification (LCC) system, both widely used in the tropics. The CTCF system focuses on the clustering of soil map units with similarity in the ability to perform ecosystem functions.

¹ Edafólogo Ph.D, Facultad de Ingeniería Ambiental, Corporación Universitaria del Meta, Unimeta.
franco.obando@unimeta.edu.co

Palabras claves:

manejo sitio específico, capacidad funcional del suelo, conservación de precisión.

Key words:

site specific management, soil functional capacity, precision conservation

Rec.: 09.09.2016

Acep.: 10.10.2016

ANTECEDENTES

En las últimas tres décadas, el avance de las tecnologías digitales y de información geográfica como herramientas para la implementación de modelos de manejo de suelos basados en el conocimiento de la variabilidad espacial de atributos específicos del suelo, han conducido a disminuir la observación de suelos y la recolección de datos de campo en detrimento de los levantamientos de suelos con enfoque geomorfológico-pedológico, bajo el supuesto que el suelo es un continuo y la delimitación de clases discretas de suelos es una ilusión subjetiva y sesgada del levantador de suelos. En efecto, el levantamiento descriptivo-interpretativo con aplicaciones multidisciplinarias está siendo reemplazado por mapas temáticos, enfocados hacia un solo atributo a la vez, p.e. carbono orgánico, conductividad eléctrica, pH, etc.) (Zinck, 2014). Sin embargo, la herramienta conceptual para la construcción de dichos mapas temáticos es el tradicional modelo multifactorial de Jenny (1941). En su obra *“Factors of soil formation. A system of quantitative pedology”* Hans Jenny manifiesta la necesidad de procedimientos matemáticos y tecnológicos para explicar la relación paisaje-suelo y los patrones de variación espacial. Luego de seis décadas, la aplicación de la matemática, la estadística y la geomática al estudio de la variación espacial y temporal de las propiedades del suelo han dado lugar al nuevo paradigma de la cartografía de suelos: el mapeo pedométrico. El mapeo pedométrico (mapeo digital) se basa en las relaciones cuantitativas entre propiedades inherentes del suelo y variables ambientales (factores de formación de los suelos) por medio del análisis de capas de datos georreferenciados, típicamente los modelos digitales de elevación o de terreno (DEM), el conocimiento experto, el conocimiento antecedente del suelo, la observación de campo y mediciones de laboratorio. En este contexto, los levantamientos de suelos con enfoque geomorfológico-pedológico no han perdido vigencia; al contrario, el uso de las tecnologías del mapeo digital junto a las tecnologías tradicionales del mapeo cualitativo, resulta en una clase mejorada de levantamientos de suelos: los levantamientos semi-cuantitativos. En países como Colombia, donde existe un acervo importante de conocimiento de la variación de los suelos a escala 1:100.000 (Malagón, 2014) la ejecución de levantamientos

detallados semi-cuantitativos, a escala 1:25.000 y más grande, serían de gran utilidad frente a los requerimientos de información de suelos para el desarrollo de políticas de gestión sostenible del suelo a nivel local, los planes de ordenamiento territorial, POT, el ordenamiento de cuencas hidrográficas (POMCA) y ecosistemas estratégicos de importancia nacional. Este enfoque plantea el reto de capacitar una nueva generación de agrólogos bajo *“el paradigma del razonamiento pedológico como modelo de formación, en vez del empirismo que aleja a los edafólogos de la senda del método científico”* (Cortés, 2014).

Por otro lado, las llamadas funciones de edafotransferencia (del inglés pedotransfer functions, PTF) han sido objeto de uso y abuso debido a la carencia de las herramientas conceptuales del mapeo científico de suelos, con enfoque geomorfológico-pedológico y la taxonomía de suelos. Una función de edafotransferencia se define como una relación matemática entre una propiedad inherente del suelo, de difícil medición, y una propiedad de fácil medición dentro de una clase específica de suelo (polipedon). Las funciones de edafotransferencia se han propuesto para facilitar la transferencia del conocimiento y la tecnología entre clases funcionales de suelos, es decir, entre suelos con capacidad similar para ejecutar una función ecosistémica específica esencial, p.e., almacenamiento de carbono, regulación hídrica, etc. o con limitantes similares para la productividad vegetal, por ejemplo, retención fosfórica, toxicidad de aluminio, baja saturación de bases, etc. lo cual es factible si la clasificación de los suelos se lleva a nivel de la familia taxonómica (Malagón, 1995). En el mapeo pedométrico, las funciones de edafotransferencia se usan para generar datos faltantes e inferir datos edáficos, y modelizar la distribución espacial de los suelos por medio de los modelos digitales de elevación del terreno, DEM (del inglés, Digital Elevation Model), a partir de pocos datos primarios disponibles, frecuentemente con pocos puntos de verificación de campo. En casos extremos de modelización *“in vitro”* se ha llegado a considerar el mapa de pendientes como un sustituto del mapa de suelos (Zinck, 2014).

Finalmente, el concepto de calidad del suelo, aunque con numerosos detractores, actualmente se

reconoce como una herramienta útil en los círculos científico y político del mundo para la planeación de uso sostenible del suelo (Imeson et al. 2011). El concepto se emitió en 1993 en un reporte de la Comisión Nacional de Investigación (NRCC) de los Estados Unidos de América, acerca de la conservación del suelo y el agua a largo plazo titulado “*Calidad del suelo y el agua: una agenda para la agricultura*” (Letey et al. 2003). Se enfocó originalmente al desarrollo de estándares de calidad del suelo frente a las consecuencias ecológicas de la agricultura industrial, inherentemente dependiente de sistemas productivos mono-funcionales (monocultivos), y el uso desmedido de insumos (agroquímicos y pesticidas) y energía fósil.

Las propuestas metodológicas para la evaluación de calidad del suelo se basan en el establecimiento de un conjunto mínimo de datos de atributos físicos químicos y biológicos vinculados a procesos y funciones ecosistémicas, medibles en una escala temporal y espacial específica (Seybold et al. 1999). En el trópico, donde las mayores preocupaciones sociales y ambientales son la inseguridad alimentaria, la pobreza rural y la degradación ecosistémica, el manejo sostenible del recurso base de la agricultura debe enfocarse no solo a satisfacer los objetivos de los agricultores de altos rendimientos agronómicos sino también los objetivos del resto de la comunidad, y la preservación y fortalecimiento del ambiente global (CIFOR, 2000, citado por Sánchez, et al. 2003).

Acorde con las ideas precedentes, se somete a consideración el sistema de clasificación de tierras por capacidad funcional ecosistémica (CTCF) como herramienta de evaluación de calidad inherente del suelo y la implementación de paisajes productivos multifuncionales en condiciones tropicales. El sistema CTCF resulta de la combinación de dos herramientas para la clasificación de suelos y tierras, de amplio uso en el trópico: el sistema de clasificación de suelos por capacidad de fertilidad, FCC (del inglés Fertility Capability Soil Classification) propuesto por Sánchez et al. (2003) y el sistema de clasificación de tierras por capacidad de uso, LCC (del inglés Land Capability Classification) propuesto por Klinbey y Montgomery (1961). El sistema FCC se basa en el uso de los datos de atributos del suelo, en términos directamente relacionados a la

producción vegetal y el manejo integral de los ecosistemas, a partir de los levantamientos detallados de suelos descriptivo-interpretativos y el conocimiento experto. El sistema LCC, aunque diseñado originalmente como una herramienta de planeación de uso y conservación del suelo a escala de finca, ha sido adaptado en muchos países con múltiples modificaciones para evaluar las restricciones y potencialidades de los suelos para su uso, manejo y conservación. En Colombia, el sistema LCC, adaptado por IGAC (2014) es la base para la definición de la vocación de uso de las tierras en Colombia (Malagón, 2014) con un enfoque holístico que reconoce las diferentes funciones que el suelo ejecuta en los agroecosistemas y los ecosistemas naturales.

CALIDAD INHERENTE Y DINÁMICA DEL SUELO

El suelo es un sistema abierto conformado por una red estructural compleja, discreta y diversa de componentes funcionales bióticos (plantas, animales y microbios) y abióticos (energía, aire, agua, materia inorgánica, y una variedad de subproductos de actividades orgánicas). En efecto, el material de suelo se forma y se desarrolla genéticamente como un sistema abierto de intercambios y transformaciones de materia y energía (Jenny, 1941). La formación de un sistema suelo es conducida por gradientes de potencial químico y físico que se producen entre la atmósfera y la biosfera en interacción con rocas y minerales. Cuando los flujos de materia y energía que circulan a través de su masa (calor, agua, carbono y elementos químicos en solución o suspensión) se hacen relativamente constantes, el suelo alcanza un determinado grado de evolución y diferenciación del pedon (individuo suelo). Así, cada suelo alcanza un determinado nivel de energía libre y capacidad inherente para ejercer funciones ecosistémicas que se expresan a través de la calidad de sus propiedades, la velocidad de los flujos que circulan a través de su masa y en la capacidad de autoequilibrio (adaptado de Degioanni et al. 2008).

El suelo como sistema abierto cambia constantemente ya sea por la acción de los factores y procesos formadores que siempre están actuando, o por las actividades humanas. En este sentido, el suelo es siempre dinámico, lo cual genera un reto, no solo en la recopilación de datos y el monitoreo del mismo,

sino también en la forma en que los datos se interpretan con relación a los cambios espacio-temporales en los procesos y funciones del suelo (Omuto et al. 2013). Los cambios de largo alcance, es decir, aquellos resultantes en el tiempo de la edafogénesis son en general difíciles de medir o monitorear; por ejemplo, para que las partículas de arcilla se formen en el suelo o los compuestos orgánicos vitales se acumulen en los horizontes superficiales se necesitan cientos o incluso miles de años (Imeson et al. 2011). En cambio, la pérdida de porosidad del suelo puede ocurrir durante un evento de labranza intensiva. En consecuencia, para facilitar la interpretación de datos de suelos se han introducido los conceptos de calidad inherente y calidad dinámica del suelo; la primera se refiere a los atributos permanentes del suelo derivados de los procesos edafogénéticos en el tiempo pedológico (siglos, milenios). La calidad dinámica hace referencia a los atributos del suelo que cambian debido al uso y manejo y ocurren en el tiempo de vida humana (días, meses, años, décadas, lustros).

LOS AMBIENTES EDAFOGÉNÉTICOS Y MORFOGÉNÉTICOS

Como se comentó previamente, los suelos alcanzan un determinado nivel de energía libre y desarrollan una calidad inherente derivada de la interacción de los factores y procesos formadores que conducen a patrones de variación espacial de suelos y la diferenciación de propiedades que pueden afectar preferencialmente una función específica. En otras palabras, la calidad de las propiedades inherentes del suelo depende de la interacción de los ambientes *morfogenéticos* (Zinck, 2012) y *edafogénéticos* (Cortés, 2014) en los cuales se formaron los suelos. Un ambiente edafogénético se define como el entorno ambiental particular que se puede delimitar como una superficie terrestre tridimensional caracterizada por la similitud de los factores formadores de los suelos lo cual se traduce en similitud en los procesos edafogénéticos y en consecuencia, similitud en el patrón de ocurrencia de suelos (Cortés, 2014). La identificación de un ambiente edafogénético es un proceso esencialmente descriptivo-interpretativo desarrollado a partir del paradigma factorial formulado por Jenny (1941):

$$S = f(c, o, r, p, t, \dots) \text{ Ecuación 1}$$

donde S representa la formación del suelo, c el clima, o los organismos incluyendo la actividad humana, r el relieve, p el material parental y t el tiempo. La precisión en la identificación de los ambientes edafogénéticos y morfogenéticos depende de la calidad de los datos espaciales o cartográficos de las variables ambientales (materiales parentales, clima, relieve) y el trabajo interdisciplinario (conocimiento experto) con el apoyo de especialistas en sistemas de información geográfica, SIG (Cortés, 2014).

De acuerdo con Belcher (1978) una forma del terreno se define como una unidad tridimensional de la superficie terrestre con un tipo específico de relieve y topografía y cuyo material litológico presenta un arreglo, determinado por su proceso formativo, las características mismas del material litológico y la acción bioclimática subsiguiente.

De lo anterior se concluye que las formas del terreno y los suelos que estas contienen se desarrollan por influencias recíprocas de los factores de formación, siendo uno u otro alternativamente dominante según las circunstancias, las condiciones y el tipo de paisaje (Zinck, 2012). La comprensión de la convergencia de los procesos edafogénéticos y morfogenéticos, evidentemente manifiesta en la formulación de Jenny (ecuación 1), es básica para la formulación de hipótesis acerca de la probable población de suelos y su distribución espacial en una determinada forma del terreno. El enfoque reposa en una combinación de conocimiento geomorfológico y pedológico básico, incrementado por el conocimiento experto, en particular la experiencia adquirida por la práctica de la observación de campo. Las geoformas proveen un marco cartográfico integral para el mapeo de suelos, que va más allá que la simple caracterización morfométrica del terreno (Zinck, 2012). En los levantamientos de suelos, los ambientes edafogénéticos se circunscriben a un nivel morfográfico específico, definido por la escala del levantamiento, v.g. tipo de relieve en los levantamientos generales y forma del terreno en los levantamientos detallados (Cortés, 2014). En las unidades geomorfológicas-pedológicas separadas en los levantamientos convencionales de suelos, aunque la variabilidad interna de los atributos del suelo

no es explícita, sirven de marco de referencia para el análisis de datos espaciales y estudios geoestadísticos de los atributos de los suelos (Zinck, 2012).

EL MODELO SCORPAN

MacBratney et al. (2003) usaron el modelo de Jenny para el desarrollo empírico de relaciones cuantitativas entre los factores formadores de los suelos, espacialmente referenciados, y las propiedades del suelo, modificando el modelo de la siguiente manera:

$$S_c = f(s, c, o, r, p, a, n) \text{ Ecuación 2}$$

donde S_c el cuerpo edáfico (polígono o unidad cartográfica de suelos) o una propiedad edafogenética específica; s es el conocimiento antecedente del suelo (información existente en los levantamientos de suelos, a saber, pedones modales, mapas y leyendas), c es el factor clima (salidas de modelos climáticos), o , organismos, (particularmente imágenes de sensores remotos de vegetación y uso de la tierra), r , relieve (modelo de elevación de terreno, DEM y sus derivados, pendientes), p , material parental (mapas geológicos digitalizados), a , edad (conocimiento experto de la edad de las geoformas), y n las coordenadas xy (atributos de las formas del terreno).

El modelo $S_{scorpan}$ constituye el soporte conceptual del mapeo pedométrico (mapas temáticos de propiedades del suelo) o la creación de una base de datos geográficamente referenciada de suelos usando métodos de observación de campo y de laboratorio, y datos de los ambientes edafogenéticos y morfognéticos (variables ambientales) por medio de modelos matemáticos y funciones predictivas de edafotransferencia. Para algunos autores, el conocimiento experto, en la práctica convencional del levantamiento de suelos, constituye un factor de subjetividad y de sesgo personal, en contraste con el mapeo pedométrico de suelos, el cual sería más objetivo (Zinck, 2012). Sin embargo, el sesgo y la subjetividad se puede solventar en gran medida, separando la estructura de la ecuación 2 en dos partes: una determinística y otra estocástica (Omuto et al. 2013). La parte determinística modela la relación paisaje-suelo con un enfoque geomorfológico-

pedológico según la ecuación 1, mientras que la parte estocástica modela la variación espacial del atributo del suelo al interior de un cuerpo edáfico o unidad cartográfica de interés particular, según la siguiente ecuación:

$$S_c = f(s, c, o, r, p, a, n) + e \text{ Ecuación 3}$$

ó,

$$S_p = f(s, c, o, r, p, a, n) + e \text{ Ecuación 4}$$

donde e es el componente estocástico o error de la variación espacial de un atributo del suelo. Para modelar el componente estocástico se han utilizado métodos geoestadísticos para evaluar, controlar y mejorar la calidad de los datos en términos de confiabilidad y precisión tales como kriging, lógica difusa, geometría fractal, inferencia de datos mediante funciones de edafotransferencia) (Omuto et al. 2013; Zinck, 2014). Las modificaciones al modelo de Jenny (ecuaciones 3 y 4) permiten incorporar al levantamiento de suelos con enfoque convencional, los métodos tecnológicamente basados y el componente cuantitativo del mapeo pedométrico. La ecuación 4 expresa la relación entre una propiedad inherente o edafogenética (S_p), vinculada a una función específica de suelo; por lo tanto, el modelo se puede expresar como:

$$S_f = f(S_p, c, o, r, p, a, n) \text{ Ecuación 5}$$

donde S_f indica una función específica del suelo, por ejemplo, almacenamiento de carbono, capacidad de retención y liberación de agua y nutrientes, etc.

El modelo $S_p S_{pcorpan}$ se propone como herramienta conceptual para la evaluación de la calidad inherente del suelo a partir de características físicas, químicas, mineralógicas y biológicas específicas (S_p) asociadas a funciones específicas (S_f) inferidas a partir de las bases de datos de atributos del suelo existentes en los levantamientos convencionales de suelos o a partir mediciones adicionales en campo y laboratorio soportadas por el conocimiento experto. Así, la variación espacial de los atributos del suelo vinculados a funciones específicas en las unidades cartográficas, de acuerdo con las ecuaciones 3 y 4 se puede expresar como sigue:

$$S_f = f(S_p, c, o, r, p, a, n) + e \text{ Ecuación 6}$$

donde S_f indica una función específica, y Sp denota una característica o conjunto de características de una clase específica de suelos (un polipredon o unidad cartográfica de suelos, UCS) vinculado a una función específica. Las características del suelo, S_p , vinculadas a funciones específicas se derivan del componente taxonómico a nivel de Familia de los levantamientos detallados de suelos. Por ende, el modelo permite optimizar el uso del conocimiento de la variabilidad espacial de los atributos en la implementación de los modelos de manejo sitio específico de suelos, los paisajes productivos multifuncionales y la conservación de precisión, descritos posteriormente.

Los suelos con capacidad similar para ejercer una función específica, por ejemplo, capacidad de almacenamiento y retención de agua, acumulación de carbono, se pueden agrupar para conformar unidades cartográficas funcionales (UCF) (Sanchez et al. 2003). El fundamento de las UCF es coherente con el sistema de clasificación del suelo por capacidad de fertilidad, FCC (fertility capability soil classification por su acrónimo en inglés) propuesto por Sanchez et al. (2003) y el sistema de clasificación de tierras por capacidad de uso, LCC (por su acrónimo en inglés Land Capability Classification) propuesta por Klingbery y Montgoamery (1961) de amplio uso en el trópico. Ambos sistemas son similares en el sentido que toman en consideración características permanentes o inherentes del suelo, como la pendiente del terreno, toxicidad de aluminio, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, etc. La agrupación de suelos por capacidad funcional se realiza por medio de la técnica del álgebra de mapas, donde el conocimiento experto juega un papel preponderante. En este proceso es particularmente importante la interpretación de la leyenda geomorfológica-pedológica, la memoria técnica de los levantamientos de suelos, las partículas formativas de la taxonomía de los suelos a nivel de subgrupo y familia taxonómica y la simbología de las unidades cartográficas de suelos.

GENERALIDADES DEL SISTEMA FCC

El sistema de clasificación de suelos por fertilidad, FCC, se desarrolló inicialmente para interpretar los atributos del suelo, utilizados para la clasificación taxonómica, de una manera directa-

mente relevante para el crecimiento de las plantas. La versión actualizada del sistema FCC se basa además de la identificación de atributos de calidad inherente del suelo relevantes para la producción vegetal y el manejo integral de los ecosistemas (Sánchez et al. 2003). El sistema FCC trata de atributos inherentes producto de la edafogénesis que cambian en no menos de un siglo, y atributos dinámicos que cambian en años o décadas. Consiste de dos niveles categóricos. La primera categoría se define por la textura del suelo superficial (tipo de suelo) y la textura del subsuelo (tipo de sustrato), horizontes A y B respectivamente, y se expresan con letras mayúsculas; por ejemplo, SC, indica textura arenosa del suelo superficial (tipo) sobre un subsuelo arcilloso (tipo de sustrato); la letra S solamente, indica textura arenosa a través del suelo y el subsuelo. La segunda categoría consiste de una condición modificadora, definida para delimitar cuantitativamente condiciones específicas de los suelos que afectan el crecimiento de las plantas. En el sistema FCC las limitaciones o potencialidades del suelo, se identifican con un sufijo (modificador) o indicador de calidad inherente, por ejemplo, toxicidad de aluminio (*a*) baja saturación de bases (*e*), fijación de fósforo en suelos con propiedades ándicas (*x*), pendiente del terreno en porcentaje (%), etc. El sistema FCC incluye 17 modificadores que se expresan con una letra minúscula. Cada suelo tiene solamente un tipo/tipo de sustrato pero puede tener varios modificadores. Por ejemplo, un suelo clasificado como *Caik* es arcilloso a través del suelo y subsuelo, con toxicidad de aluminio, alta fijación de fósforo y bajo contenido de minerales meteorizables, modificadores indicados por las letras *a*, *i* y *k* respectivamente. La designación FCC para un suelo dado se puede interpretar con relación a diferentes funciones y usos de la tierra, lo cual es coherente con la ecuación 6, donde S_f es una función ecosistémica específica del suelo vinculada a un atributo del suelo, Sp , como indicador de calidad inherente del suelo. El tipo/tipo de sustrato y la condición modificadora son los atributos del suelo S_p , vinculados a la función específica del suelo (S_f) de retener y liberar nutrientes. Los superíndices + o - se usan para indicar una expresión mayor o menor del modificador (Sánchez et al. 2003). Lince y Obando (2013) aplicaron el sistema FCC a la zonificación sitio-específico de capacidad funcional

en un paisaje productivo de la región andina central colombiana. Se usaron modificadores derivados de la mineralogía de arcillas, horizontes y profundidad, porosidad total, distribución de poros, actividad microbiológica (raíces y lombrices) y estructura del suelo, entre otras (figura 1).

GENERALIDADES DEL SISTEMA LCC

El sistema de clasificación de tierras por capacidad de uso (Land Capability Classification), diseñado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, es un sistema categórico basado en la estimación cualitativa de indicadores, cuyo objetivo principal es el uso de datos edafológicos específicos de fácil lectura, lo cual es coherente con las

características de los indicadores usados en las metodologías de evaluación de calidad del suelo (Lal, 1994). El sistema reconoce ocho clases (1-8) definidas a partir de la combinación del uso potencial de la tierra y la intensidad de limitaciones inherentes de erosión, humedad, suelo y clima (Morgan, 1990). En general, el número y el grado de las limitaciones incrementa de la primera a la octava clase y el potencial para usos alternativos se estrecha. El sistema supone que a medida que la pendiente del terreno incrementa, el riesgo de degradación por erosión aumenta, las opciones de uso se reducen y las prácticas de conservación son más exigentes. Bajo este esquema de interpretación y aplicación, el sistema de clasificación por capacidad de uso es coherente con los principios de calidad del suelo, el sistema FCC y el modelo de paisaje productivo

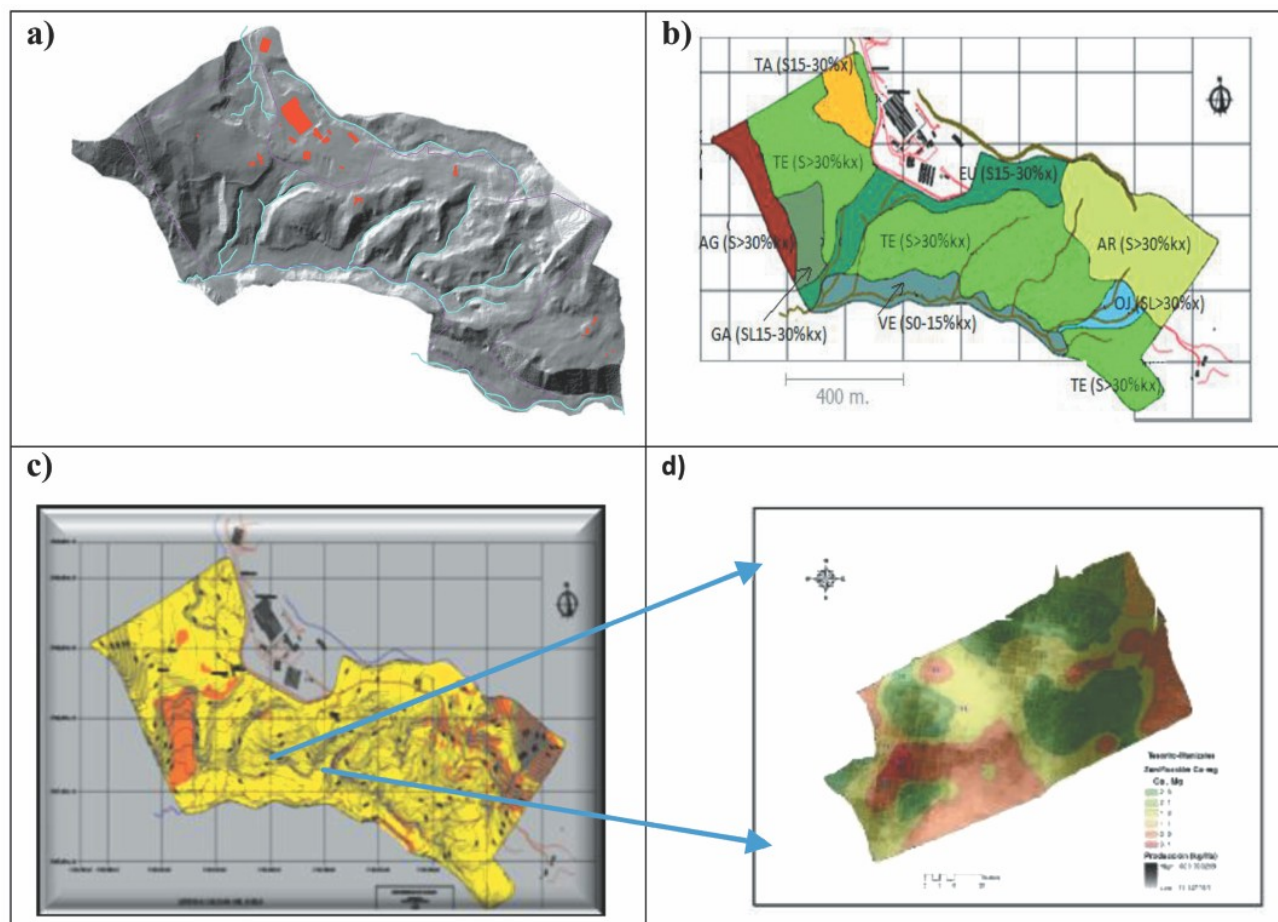


Figura 1. a) Modelo de Elevación de terreno de la finca Tesorito (Obando et al, 2003; b) y c) mapa ultra-detallado de suelos y mapa de zonificación de suelos por capacidad funcional respectivamente (Lince y Obando (2013); d) variabilidad espacial de Ca y rendimiento de mora (Obando, 2014).

multifuncional. El sistema original sugiere que la agricultura sostenible es factible solamente en las cuatro primeras clases (1-4) con limitaciones aumentativas y en consecuencia menor oportunidad de escoger posibles cultivos. Las subsiguientes dos clases (6-7) son aptas para bosques y pastoreo, y la clase 8 debe ser destinada exclusivamente para la conservación del suelo y la calidad ambiental (Calzori et al. 2009). La clase 5, constituye una excepción y se aplica para situaciones especiales, tales como áreas demasiado húmedas, pedregosas o salinas que limitan los cultivos (Shaxson, 1999). La razón tradicional para clasificar las tierras como no cultivables es el ángulo de la pendiente y el consiguiente riesgo a la erosión (Young, 1991). Bajo condiciones de agricultura convencional, la limitación por la pendiente es usualmente dominante, y se indica por medio de un sufijo. La metodología adaptada por IGAC (2014) identifica las clases de capacidad por números arábigos de 1 a 8 y las subclases por medio de letras minúsculas que corresponden a indicadores o limitaciones de capacidad de uso, a saber: *p*, *e*, *s*, *h*, *c* que indican pendiente, riesgo a la erosión, suelos, humedad, y clima respectivamente. En el sistema de clasificación de tierras por capacidad funcional (CTCF), las subclases corresponden a los modificadores del sistema FCC. Por lo tanto, para evitar redundancia, su usa solamente el número arábigo de la clase por capacidad de uso, seguida de la clasificación por el sistema FCC.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE TIERRAS POR CAPACIDAD FUNCIONAL, CTCF

El propósito de la zonificación de tierras por capacidad funcional es agrupar unidades cartográficas de suelos con capacidad similar para ejecutar funciones ecosistémicas específicas o por limitaciones para la productividad agronómica. Por ejemplo, los andisoles y los inceptisoles con propiedades ándicas se pueden agrupar por su alta capacidad de retención fosfórica y almacenamiento de carbono (Lince & Obando, 2013). Así, una clase 3LC_{ax} (25%) indica tierras clase 3 por capacidad de uso, con textura franca (L) sobre arcillosa (C), toxicidad de aluminio (*a*), alta retención de fósforo debido a propiedades ándicas del suelo (*x*), y alto

riesgo a la erosión hídrica debido a la pendiente del terreno (25%). Asimismo, los oxisoles y los inceptisoles con características óxicas se podrían agrupar por que comparten características tales como baja disponibilidad de nutrientes, alta acidez y alta susceptibilidad a la erosión hídrica; así, una unidad funcional de suelos 6SC*aei*, indica tierras clase 6, según capacidad de uso, con suelos de textura arenosa (*S*) sobre arcillosa (*C*), toxicidad de aluminio (*a*), baja disponibilidad de nutrientes (*e*), y alta fijación de fósforo (*i*). Palacios y Obando (2015) usaron el modelo conceptual $S_p S_p corpan$ (ecuación 5) para la zonificación funcional de las tierras de páramos en Colombia, con base en los levantamientos de suelos a escala 1:25.000. Los suelos se agruparon según su capacidad para ejecutar tres funciones ecosistémicas vitales, a saber, retención y liberación de agua, almacenamiento de carbono y conservación de la biodiversidad endémica. Las características edafogenéticas vinculadas a las funciones mencionadas incluyeron contenido de carbono orgánico, retención de agua y forma del terreno. El sistema CTCF no cuenta con indicadores o modificadores relacionados a las funciones ecosistémicas mencionadas. No obstante, la conservación de la biodiversidad y la regulación hídrica son inherentes a la clase 8; en consecuencia, la inclusión de modificadores para estas funciones podría resultar redundante. Los autores del sistema FCC convocan a la comunidad científica a sugerir modificadores para compactación, encostrado superficial, biodiversidad y materia orgánica (Sánchez et al. 2003), llamado que es igualmente aplicable al sistema CTCF.

PAISAJE PRODUCTIVO MULTIFUNCIONAL

El paisaje productivo multifuncional se fundamenta en el principio que el suelo es un sistema vivo que ejerce funciones esenciales en los límites de los ecosistemas y usos de la tierra y es gobernado por los flujos de agua, nutrientes y energía; en otras palabras, se fundamenta en el principio de calidad del suelo. En consecuencia, la implementación del modelo de paisaje productivo multifuncional implica, en primera instancia, valorar la capacidad del suelo no solo para ejercer la función de producir cultivos y pastos de alta calidad sino también proteger el ambiente. Desde esta perspectiva, el modelo

de paisaje productivo multifuncional se ajusta al modelo de manejo integrado de los recursos naturales, MIRN (INRM, por su acrónimo en inglés) definido como “*el uso sostenible del recurso base de la agricultura, con el fin de satisfacer no solo los objetivos de producción de los agricultores sino también los objetivos del resto de la comunidad, y la preservación y fortalecimiento del ambiente global*” (CIFOR, 2000, citado por Sánchez, et al.2003). El paisaje productivo multifuncional es una aproximación holística que considera la capacidad intrínseca del suelo para ejercer funciones ecosistémicas y servicios ambientales esenciales (retener, almacenar y transportar agua, liberar y transportar nutrientes, secuestrar y almacenar carbono, soporte de biodiversidad, acervo genético, productividad agronómica, belleza escénica y cultural, entre otras). Este enfoque holístico diferencia al paisaje productivo multifuncional del paisaje productivo mono-funcional que se orienta esencialmente a maximizar los rendimientos de los cultivos bajo la dependencia del uso intensivo de fertilizantes y otros agroquímicos.

El modelo de paisaje productivo multifuncional aplica tanto para fincas pequeñas como para fincas grandes. Su implementación, en el marco del MIRN, se ejecuta en etapas, desde la identificación de los problemas de manera participativa, cuantitativa y multidisciplinaria, incluyendo agricultores, investigadores y tomadores de decisiones hasta la diseminación de las soluciones y uso social del conocimiento. Ikerd (2016) sugiere que una finca extensa puede ser multifuncional si se planifica y maneja como un conjunto de fincas pequeñas. Este enfoque es coherente con el modelo de manejo sitio-específico de suelos, la conservación de precisión y los modelos agrobiodiversos propuestos por Brookfield y Stocking (1999).

PAISAJES PRODUCTIVOS MULTIFUNCIONALES TECNOLÓGICAMENTE BASADOS

El modelo de paisaje productivo multifuncional tecnológicamente basado, considera las relaciones espaciales de los flujos de agua, nutrientes, solutos, transporte de suelo y sedimentación a través del paisaje para lo cual se requiere el uso de herramientas de captura y análisis de datos espaciales tales como los sistemas de posición global (GPS),

los sensores remotos (SR), los sistemas de información geográfica (SIG), la geoestadística, el modelamiento y el análisis de mapas. El levantamiento detallado de suelos, con enfoque geomorfológico-pedológico, es indispensable para comprender e interpretar la relación entre los procesos geomorfológicos y la dinámica actual de los flujos de suelo, agua y nutrientes los cuales puede ser alterados significativamente por las intervenciones humanas. En efecto, los levantamientos edafológicos con enfoque geomorfológico-pedológico facilitan el análisis del conjunto relieve-drenaje, la naturaleza del material parental y la edad de la geoforma, factores que correlacionan fuertemente con las características inherentes del suelo (ecuaciones 4, 5, 6) y la diversidad edáfica. La implementación del modelo de paisaje productivo multifuncional tecnológicamente basado, parte del levantamiento ultra-detallado de suelos, donde las unidades cartográficas de suelos (consociación y complejo de suelos) y las unidades taxonómicas a nivel de familia constituyen la base para la conformación de las unidades cartográficas funcionales (UCF). La variabilidad interna de las características de los suelos no es implícita en los levantamientos convencionales de suelos; por lo tanto, una vez se definen las UCF, de interés particular, se inicia el análisis de la variabilidad espacial de los atributos del suelo por medio de la geoestadística (ecuación 6) con el fin de delimitar zonas de manejo sitio-específico. La figura 1 es un ejemplo del proceso aplicado a un paisaje productivo de la zona andina central de Colombia.

El paisaje productivo multifuncional tecnológicamente basado es coherente con el paradigma de conservación de precisión descrito por Delgado et al.(2008) quienes reportan que la combinación de zonas de conservación de precisión (ZCP) y zonas de manejo sitio-específico (ZMSE) puede ser un procedimiento viable para llevar al máximo los retornos económicos y la eficiencia del uso de los recursos y la conservación del suelo y el agua.

CONCLUSIÓN

Frente a la falta de protocolos para la evaluación de calidad del suelo, en términos de su capacidad para ejercer y prestar servicios ambientales a la escala de paisaje productivo, se propone un sis-

tema de clasificación funcional del suelo como una herramienta conceptual asequible a diversos usuarios, particularmente investigadores y tomadores de decisiones en torno a la gestión sostenible del recurso suelo a escala local. Frente al momento coyuntural del país, de cambios vinculados a los procesos de restitución de tierras, la sustitución de cultivos ilícitos, los POMCA, los POT, los proyectos de gestión ecosistemas estratégicos, el desarrollo de la Altillanura de la Orinoquia, entre otros, es necesario el uso del conocimiento, sustentado en herramientas conceptuales y tecnológicas acorde con las particularidades de los ambientes tropicales, en particular, la variabilidad edáfica, la variación espacial de los atributos del suelo y en consecuencia la variabilidad de las funciones ecosistémicas esenciales. Así, la clasificación de tierras por capacidad funcional es una guía metodológica fundamentada en la experiencia y conocimiento experto del autor quien desde una mirada académica y científica invita a la crítica constructiva para el mejoramiento de la metodología propuesta.

REFERENCIAS

- BELCHER, D. 1978. Atlas de las formas de la tierra. Universidad de Los Andes, Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, CIDIAT. Mérida Venezuela. 33p.
- BROOKFIELD, H. STOCKING, M. 1999. Agrodiversity: definition, description and design. *Global Environmental Change* 9 (2): 77-80.
- CALZORI, C., COSTANTINI, E.A., UNGARO, F. VENUTI, L. 2009. Soil and Land Evaluation: History, Definitions and Concepts. Ed. Costantini, E. CRA-Centro di ricerca per l'agrobiologia e la pedologia, Florence, Italy. 549p: 3-33. Science Publishers. Enfield, NH, USA.
- CORTÉS, A. 2014. Reflexiones para edafólogos reconocedores en la etapa de los levantamientos semidetallados. Bogotá. D.C. 86p
- DEAGIOANNI, A., BRICCHI, E., HAMPP, E. 2008. La energía en la formación de los suelos: aspectos teóricos y metodológicos para su evaluación. *Cienc. suelo* vol.26 no.1: Buenos Aires. Disponible en línea. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672008000100009
- DELGADO, J., BERRY, J.K. 2008. Advances in Agronomy, Volume 98. Advances in Precision conservation. Edited by Donalld L. Sparks. Elsevier Inc. Academic Press.
- DORAN, J.W., JONES, A.J., ARSHAD, M.A. Y GILLEY, J.E. 1999. Determinants of soil quality and health. En: Lal (Ed.). Soil quality and soil erosion. Soil and Water Conservation Society, Ankeney, Iowa. CRC press. Boca Raton, Florida, 329p.
- IKERD, J. 2016: Multifunctional small farms: essential for agricultural sustainability and global food sovereignty. *Livestock Research for Rural Development*. Volume 28, Article #192. Retrieved September 22, 2017, from <http://www.lrrd.org/lrrd28/11/iker28192.html>
- IMESON, A., ARNALDS, O., MONTANARELLA, L., ARNOLDUSSEN, A., VAN ASSELEN, S., CURFS, M. & ROSA, D. DE LA (eds.) 2011. Soil conservation and protection in Europe: The way ahead. Publication European Union. 159 p.
- CHRISTIAN OMUTO, FREDDY NACHTTERGAELE AND RONALD VARGAS ROJAS. 2013. Global partnership technical report. State of the art report on global and regional soil information: where are we? Where to go. FAO. Rome.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC 2014. Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso. Copia no controlada. Grupo interno de trabajo Levantamiento de suelos. Subdirección de Agrología. Bogotá D.C. 43p.
- JENNY, H. 1941. Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. Dover publications INC, New York.
- KLINGEBIEL AND P. H. MONTGOMERY. 1961. Land-Capability Classification. *Agriculture Handbook* No. 210. Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052290.pdf
- LAL, R. 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. USDA. SMSS Technical Monograph N° 21. The Ohio State University, Columbus.
- LINCE, A., OBANDO, F.H. 2013. Evaluación sitio específico de calidad funcional del suelo en zona de ladera. *Suelos Ecuatoriales*, 43(1): 17-23.
- LETEY, J., SOJKA, D.R., UPCHURCH, D.K., CASSEL, D.K., OLSON, K.R., PAYNE, W.A., PETRIE, S.E., PRICE, G.H., REGINATO, R.J., SCOTT, H.D., SMETHURST, P.J., AND TRIPETT, G.G. 2003. Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal of soil and water conservation* 58 (4):180-187.
- MCBRATNEY, A.A., MENDOCA-SANTOS, M.L., MINASNY, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117(3):3-52.

- MALAGÓN, D. 1995. Clasificación de suelos de Colombia. En IGAC: Suelos de Colombia. Bogotá, Colombia.
- MALAGÓN, D. 2014. Aplicaciones de los levantamientos de suelos en Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, 44(2): 106-112.
- MORGAN, R.C.P., 1990. Soil erosion and conservation. Edited by D. A. Davison University of Strathclyde. Longman Scientific and Technical. Essex. England.
- OBANDO, F.H., VILLEGAS, M., BETANCUR, J., AND ECHEVERRY, L. 2006. Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands arenoso de la región andina central colombiana. *Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional, Medellín*, Vol. 59 (1):3217-3235.
- OBANDO F.H. 2014. Informe de actividades Proyecto "Manejo de la fertilidad del suelo por sitio específico para la producción sostenible del cultivo de la mora (*Rubus glaucus*) en el Departamento de Caldas". Universidad de Caldas, Manizales. Código MADR: 2008L5913.
- PALACIOS, A; OBANDO, F.H. 2015. Metodología para la zonificación de tierras de páramos con base en funciones ecosistémicas del suelo. Documento interno de trabajo. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, Subdirección de Agrología. Sin publicar.
- SANCHEZ, P.A.; PALM, C.A.; BUOL, S.W. 2003. Fertility Capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma* 114,157-185.
- SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E.; BREJDA, J.J. 1999. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Science*. 164 (4) 224-234.
- SHAXSON, F. 1999. New Concepts and Approaches to land management in the tropics with emphasis on steeplands. *Soils Bulletin* 75. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, pp. 5-6.
- YOUNG, A. 1991. Agroforestry for soil conservation. C.A.B. International Council for Research in Agroforestry. Wallingford, Oxon, UK. 276p
- ZINCK, J.A. 2012. Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC Special Lecture Notes Series. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands. 123p: 38-51 (Capítulo 4: El paisaje pedológico: organización del material suelo).
- ZINCK, J.A. 2014. Suelos, información y sociedad. *Suelos Ecuatoriales*, 44(2): 113- 124.