

**PRIORIDADES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA
DEL SUELO Y SUS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS
ASOCIADOS, DEGRADADOS POR USO AGROPECUARIO
EN LA MICROCUENCA SANTA HELENA (SUESCA-
CUNDINAMARCA)**

**Priority of soil ecological restoration and its associated ecological
services degraded by agricultural use in Santa Helena Microbasin
(Suesca-Cundinamarca)**

MILENA CASTRO-ROMERO

CESAR VALDÉS-LÓPEZ

JOSÉ IGNACIO BARRERA-CATAÑO

*Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Biología, Unidad de Ecología y Sistemática (UNESIS), edificio Jesús Emilio Ramírez, S.J., laboratorio 408B, Bogotá D.C., Colombia.
e.castro@javeriana.edu.co, cvaldes@javeriana.edu.co, barreraj@javeriana.edu.co*

RESUMEN

Se detectó, por medio del análisis del estado de conservación de los ecosistemas de la microcuenca Santa Helena, que el uso agropecuario intenso ha ocasionado una disminución de los servicios ecosistémicos del suelo (SES), lo cual puede poner en peligro la estabilidad económica y la seguridad alimentaria de las comunidades locales que dependen de ellos. El análisis permitió identificar las prioridades de restauración ecológica (RE) del suelo y sus servicios ecosistémicos asociados necesarias para su recuperación. Se estimó el nivel de conservación del suelo (NCS) para prestar servicios ecosistémicos, se halló el valor económico de los suelos (VES) y se definieron prioridades de restauración del suelo para cada caso. Para los NCS se definieron cuatro niveles que permitieron calificar el 10.2% del área de la microcuenca con nivel de conservación (NCS) muy bajo, el 53% con NCS medio y 23.6% con NCS alto. Para el VES se definieron tres niveles que aplicados a las 43 Unidades de Paisaje (UPs) consideradas para la microcuenca, permiten diferenciarlas económicamente como de VES bajo (18 UPs), VES medio (9 UPs), VES alto (8UPs) y VES muy alto (8 UPs). La prioridad de restauración muy alta se evidenció en las UPs con VES bajo y con NCS bajo y muy bajo. Las UPs con VES alto y NCS alto presentaron baja prioridad de restauración.

Palabras clave. Restauración ecológica, Servicios ecosistémicos, recuperación de suelo, evaluación del paisaje, Valoración económica.

ABSTRACT

In the Santa Helena's microbasin, the intense livestock and agricultural activities have promoted degradation of ecosystems and declination of soil ecological services (ESSs), which are the support for natural communities and people activities. We found that if actions for reestablishment ESSs are not taken, the environmental degradation will not stop, and people and natural communities that inhabit the microbasin will not be able enjoy these ESSs. Through the analysis of the soil ecological services

(SESS) and the farm economic valuation (FEV), we defined a function to identify priorities for soil restoration for each case. For this, the ecological services of the soil (ESSs) in the microbasin were identified, the capacity of soil to provide ESS was estimated, the microbasin's farms were economically evaluated and the priorities of soil reestablishment were defined. We identified four levels of ESSs' conservation (LCs); of the 95.3 hectares evaluated in the microbasin, 10.2% of them had a very low LC, 53% had medium LC and 23.6% showed high LC. At the landscape level, out of 43 landscape units that were chosen to undertake the farm economic valuation (FEV), 18 landscape units had low score FEV, 9 landscape units had medium FEV and 16 landscape units had high to very high FEV. The Landscape units that showed low and very low conservation or low FEV were qualified with very high priority for ER, while the landscape units with high LCs or those which had high FEV were qualified low priority of ER.

Key words. Economic valuation, Ecological services, Ecological restoration, Landscape evaluation, Soil recovery.

INTRODUCCIÓN

Las transformaciones causadas por el uso del paisaje en la región andina de Colombia dejan como remanentes tan solo el 31% de los bosques naturales y una degradación del 53% en sus arbustales secos. Para el año 1998, aproximadamente el 69% de los bosques andinos (180 600 km²) habían sido talados (Etter 1998, Mendoza & Etter 2002, Etter *et al.* 2006). Para el caso específico de Santa Helena (Suesca – Cundinamarca), hay registros que aseveran que debido al uso agropecuario intenso y continuo en la microcuenca hay una transformación y degradación tan fuerte que hoy es posible observar áreas desprovistas de cobertura vegetal y de suelo con estados muy avanzados de degradación que hacen muy difícil pensar en el restablecimiento de la estructura y función de sus ecosistemas (Barrera *et al.* 2004, Barrera & Valdés 2007). Son precisamente estas propiedades a las que se hace referencia cuando se habla de capital natural y de su recuperación (Costanza & Daly 1992).

Mientras mejor sea el estado de conservación, mayor es el capital natural; esta es una visión de los recursos naturales desde una perspectiva económica (Costanza & Daly 1992,

Aronson *et al.* 2007). Según este enfoque, y considerando la pérdida paulatina de capital natural que presenta la microcuenca Santa Helena, sus habitantes perciben menos beneficios por los servicios ecosistémicos (BSE) que los que les brindaría el paisaje en mejores condiciones (Westman 1977 & Daily 1997). Así, por ejemplo, al perder atributos como el contenido de materia orgánica y la diversidad de especies de artropofauna, el suelo se degrada (Lal 1994, 1997, Guariguata & Ostertag 2002) y se hacen más difíciles y costosas las actividades agropecuarias; esto representa una pérdida de los servicios ecosistémicos (Lal 1994, 1997) y una merma en la calidad de vida de sus pobladores (Aronson *et al.* 2007). La degradación de la microcuenca de Santa Helena amenaza la subsistencia de sus pobladores, por lo cual es necesario promover alternativas para una restauración ecológica (RE) que posibilite el restablecimiento de los bienes y servicios ecosistémicos (BSE) (Hobbs & Norton 1996, Ehrenfeld 2000, Aronson *et al.* 2007).

Por lo general, las comunidades que degradan los territorios a través de sus actividades agropecuarias no dimensionan los costos que tal degradación genera (Westman 1977), ya que se manifiestan paulatinamente en la

disminución de los ingresos netos que se obtienen de las cosechas o en la depreciación de sus predios. Para abordar estos problemas, en este estudio se presenta una propuesta metodológica para la priorización de alternativas de restauración ecológica, a través de la identificación y valoración del estado de conservación de los BSE proveídos por el suelo y la valoración económica de los suelos (Gómez 1997, Costanza *et al.* 1997, 1998, 2007). Adicionalmente, se proponen criterios para identificar las actividades necesarias para la restauración y el costo de implementarlas, de tal modo que se facilite el establecimiento de un diálogo entre las poblaciones humanas afectadas y las entidades ambientales encargadas de implementar los procesos de restauración (Loomis *et al.* 2000).

METODOLOGÍA

Santa Helena es una de las microcuencas que configuran el sistema hídrico de la Laguna de Suesca y se localiza en la Vereda El Hatillo del municipio de Suesca, entre los 73° 47' 33" y 73° 46' 57" de longitud oeste y entre los 5° 09' 9" y los 5° 8' 42" de latitud norte. Su área es de 107 hectáreas y presenta una variación altitudinal entre 2890 y 3050 m.s.n.m. El clima es frío subhúmedo, con una temperatura promedio mensual que oscila entre 10.7 y 12.3°C y una precipitación promedio anual de 838 mm. Las épocas secas se presentan en enero, febrero, septiembre y diciembre, y las épocas más lluviosas entre abril y julio y durante el mes de octubre. De acuerdo con Barrera *et al.* (2004), aunque existen períodos de sequía fuertes, éstos no permiten detectar condiciones de estrés hídrico en el suelo, ni la repartición de lluvias presenta niveles de concentración que sugieran contrastes fuertes en la dinámica erosiva de la microcuenca.

La identificación de las prioridades de restauración ecológica del suelo y sus servicios ecosistémicos asociados en Santa Helena

tuvo en consideración los siguientes pasos: 1) identificación de los servicios ecosistémicos del suelo (SES), con base en los lineamientos de Costanza *et al.* (1997), Daily *et al.* (1997), Daily (2000) y Postel & Thompson (2005). Se utilizó como insumo la información cartográfica y ecológica realizada en un estudio previo de caracterización de Unidades de Paisaje de la microcuenca a escala 1:8000 (Valdés 2004). 2) valoración de los niveles de conservación del suelo (NCS). 3) estimación del valor económico de los suelos. Finalmente, 4) priorización de las áreas para la RE.

Para la estimación del nivel de conservación del suelo se elaboró una función basada en la combinación del índice de calidad del suelo (ICS) (Doran & Parkin 1996) y el índice de procesos denudativos (PDS), construido a partir de conceptos geomorfológicos sobre procesos y dinámica denudacional (Villota 1991). La función fue aplicada a cada una de las unidades de paisaje que contenían la información necesaria para su cálculo, utilizando la cartografía ecológica mencionada (Valdés 2004), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{NCS} = (\text{ICS} + \text{PDS}) / 2$$

El índice NCS oscila entre cero (0) y uno (1), correspondiendo a cero el mínimo nivel de conservación del suelo y a uno el máximo. Cada uno de los índices que conforman el NCS utilizan la misma escala de valores, se refieren a propiedades complementarias del suelo y ambos son considerados con igual grado de importancia; por tal motivo la fórmula consiste en una suma equitativamente ponderada de sus valores. Para establecer la calidad de prestación de los SES, algunos autores usan únicamente el índice de calidad del suelo (ICS), mientras que otros recurren al uso de variables que definen atributos específicos del suelo (Jenkins *et al.* 2010). Para nuestro caso, se utilizó el nivel de conservación del suelo por considerarlo el mejor estimador de su salud (Bezdicsek *et al.*

1996, Doran & Parkin 1996, Doran *et al.* 1999, Doran 2000) bajo la premisa de que a un mayor nivel de conservación del suelo corresponde una mejor prestación de los SES y, a su vez, un menor nivel de conservación del suelo determina una deficiente prestación de los SES (Westman 1977, Norberg 1999, Daily 2000, Postel & Thompson 2005, Aronson *et al.* 2007, Costanza *et al.* 2007).

El Índice de Calidad del Suelo (ICS) está en función de cinco variables relacionadas con atributos químicos, físicos y biológicos, que han sido recomendados por varios autores (Doran & Parkin 1996, Doran *et al.* 1999, Doran 2000). Estos atributos fueron cuantificados para la microcuenca en estudios previos realizados por Jiménez (2004) y Rondón (2007) y corresponden a: porcentaje de materia orgánica (M.O%), relación carbono/nitrógeno óptimo (C/N), fertilidad, densidad aparente (DA) y

diversidad de artropofauna edáfica, los cuales requieren para su estimación el conocimiento previo de las variables carbono orgánico (C.O%), Nitrógeno total (N) y textura. El ICS fue construido a partir de la estandarización del comportamiento de cada una de las variables consideradas, siguiendo las recomendaciones de varios autores (Giller *et al.* 1997, Anónimo 1999, Porta-Casanellas *et al.* 2003), de tal modo que cada una se expresa en una escala de valoración que oscila entre cero (0) y uno (1), donde cero corresponde al mínimo valor de calidad de la variable y uno al de mayor valor de calidad (Tabla 1). El índice ICS se configura a través de la suma de los valores obtenidos para cada una de las variables intervinientes, ponderada por el número total de ellas, según la siguiente fórmula:

$$ICS = (Vo(\%MO) + Vo(C/Nopt) + Vo(Fert) + Vo(DA) + Vo(Div))/5$$

Tabla 1. Criterios y valores de calificación de los atributos del suelo utilizados para calcular el Índice de Calidad del Suelo (ICS) en la microcuenca Santa Helena.

M.O. (%)	Variación	1 – 5		5 – 10		10 – 15		
	Apreciación	Bajo		Medio		Alto		
	Calificación (Vo)	0		0.5		1		
C/N	Límites de variación	< 7 / > 20		7 – 9 / 12 – 19		9 – 12		
	Apreciación	Muy Baja / Muy Alta		Baja / Alta		Optima		
	Calificación (Vo)	0		0.5		1		
Fertilidad (Fert)	Límites de variación	< 3.6	3.6 – 5.1	5.2 – 6.7	6.7 – 8.4	> 8.4		
	Apreciación	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy Alta		
	Calificación (Vo)	0	0.25	0.5	0.75	1		
Densidad Aparente (DA)	Textura	Límites de variación	>1.47		1.39		<1.10	
		Apreciación	Restringen crecimiento radicular		Afecta crecimiento radicular		Ideales	
		Calificación (Vo)	0		0.5		1	
	Ar.	Límites de variación	>1.75		1.60		<1.40	
		Apreciación	Restringen crecimiento radicular		Afecta crecimiento radicular		Ideales	
		Calificación (Vo)	0		0.5		1	
Diversidad de morfotipos de edafofauna (Índice de Shannon) (Rondón, 2007)	Variación	0.693	0.928	1.300	1.471			
	Calificación (Vo)	0	0.33	0.67	1			
	Ecuación ICS = (Vo%MO + VoC/N + VoFert + VoDA+ VoDiv)/5							
Variación de calificación del Índice de Calidad del Suelo (ICS)		Baja 0 - 0.33		Media 0.34 – 0.66		Alta 0.67 - 1		

Fuentes: Elaboración de los autores basada en criterios de Giller *et al.* 1997, Anónimo 1999, Porta-Casanellas *et al.* 2003.

Para la valoración de procesos denudativos del suelo (PDS) se usó la clasificación de procesos denudativos (erosión, soliflucción, deslizamientos y desplomes) y los siete grados cualitativos de severidad identificados en las unidades de paisaje de Santa Helena (Valdés 2004), para transformarlos en valores numéricos crecientes y equidistantes entre cero (0) y uno (1) que califican los PDS de acuerdo con la gravedad y la severidad del proceso detectado (Tabla 2).

Tabla 2. Calificación de los límites de variación de procesos erosivos del suelo (PDS) en la microcuenca Santa Helena.

Tipo y grado de severidad de procesos denudativos	Calificación	PDS
Soliflucción plástica moderada a severa con micro-deslizamientos y desplomes	0	Alto
Soliflucción plástica moderada y micro-deslizamientos	0.143	
Erosión laminar severa	0.286	
Erosión laminar moderada a severa	0.429	Medio
Soliflucción plástica moderada	0.572	
Soliflucción en pata de vaca ligera a moderada	0.715	
Soliflucción plástica ligera	0.855	Bajo
Ninguno	1	

Fuentes: Elaboración de los autores basada en Villota 1991.

La valoración económica de los suelos tuvo en cuenta el valor comercial por hectárea mencionado por los propietarios o habitantes de los predios a través de una encuesta estructurada. La proyección del

valor mencionado por hectárea de los predios sobre el mapa de Unidades de Paisaje (Figura 3) permitió la estimación del valor económico del suelo (VES) por unidad de paisaje. Para el único predio cuya área se encontraba principalmente fuera de la microcuenca, se estimó el VES a partir de la aproximación del valor al de las fincas cercanas, ya que sólo una pequeña porción del predio se encontraba dentro del área de estudio.

Los VES de cada unidad de paisaje se transformaron a valores cualitativos asignando una calificación baja a valores del suelo inferior a \$5 000 000/ha, media a valores entre \$5 000 000/ha y \$10 000 000/ha, alta a valores entre \$10 000 000/ha y \$ 15 000 000/ha, y muy alta a valores mayores a \$ 15 000 000/ha (valores fueron estimados en COL\$ de 2009). La calificación atribuida se basó en la percepción de valor expresada por los encuestados y la valoración por hectárea para varios sectores rurales similares al área estudiada en la sabana de Bogotá, mencionada en avalúos realizados por la Lonja de propiedad raíz de Bogotá (Anónimo 2002). Para hallar la prioridad de restauración ecológica del suelo y sus servicios ecosistémicos se siguieron los lineamientos de Palik *et al.* (2000) quien, partiendo de un enfoque jerárquico, define que los atributos geomorfológicos y edáficos son suficientes para predecir posibles configuraciones de “ecosistemas”, lo cual fue útil para la definición de prioridades de restauración, complementado con el uso del criterio de “umbral de irreversibilidad” desarrollado

Tabla 3. Matriz de decisión para establecer prioridad de restauración para cada unidad de paisaje, basada en la valoración conjunta del nivel de conservación del suelo (NCS) y el valor económico del suelo por hectárea (VES).

Valor económico del suelo/ha	Nivel de conservación del suelo (NCS)			
	Alto	Medio	Bajo	Muy Bajo
Muy Alto	Baja	Baja	Media	Alta
Alto	Baja	Media	Alta	Alta
Medio	Baja	Media	Alta	Muy alta
Bajo	Media	Media	Muy alta	Muy alta

Fuentes: Elaboración de los autores.

por Aronson *et al.* (1993), relacionado con el incremento de los costos de restauración en la medida en que los disturbios aproximan la degradación de los ecosistemas a estados irreversibles. Se utilizó una matriz cruzada de doble entrada (Tabla 3) en la que se combinan cada una de las cuatro categorías halladas para NCS y VES. Se definieron cuatro tipos de prioridad que corresponden a muy alta, alta, media y baja, asignando prioridad muy alta a unidades de paisaje con valores muy bajos tanto de NCS como de VES y prioridad baja a aquellas que presentan valores altos, tanto de NCS como de VES.

RESULTADOS

Los siguientes servicios ecosistémicos se identificaron como relevantes para la evaluación del NCS en la microcuenca Santa Helena: soporte físico de las plantas, retención y liberación de nutrientes a las plantas, eliminación de desechos y materia orgánica muerta, regulación de los ciclos bioquímicos y hábitat para entomofauna.

De las 67 unidades de paisaje (UPs) identificadas para la microcuenca, que ocupan un área de 1,07 km², sólo fueron seleccionadas 43 UPs que ocupan 86,2% del área total. Las UPs restantes no pudieron ser incluidas en este estudio, ya que no contaban con toda la información necesaria para la caracterización de los atributos requeridos para nuestro análisis.

En la Figura 1 se ilustra la forma como se distribuyen el nivel de conservación del suelo (NCS) y el valor económico del suelo (VES) en el número de UPs existentes en el área; 16 Ups, que ocupan casi la cuarta parte del área, presentan niveles de deterioro significativamente altos. Un poco menos de la tercera parte de la cuenca presenta niveles altos de conservación del suelo (Figura 2).

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los atributos evaluados en este trabajo y su relación con las prioridades de restauración ecológica designadas. Como se puede apreciar, 16 unidades de paisaje (UPs), que comprenden

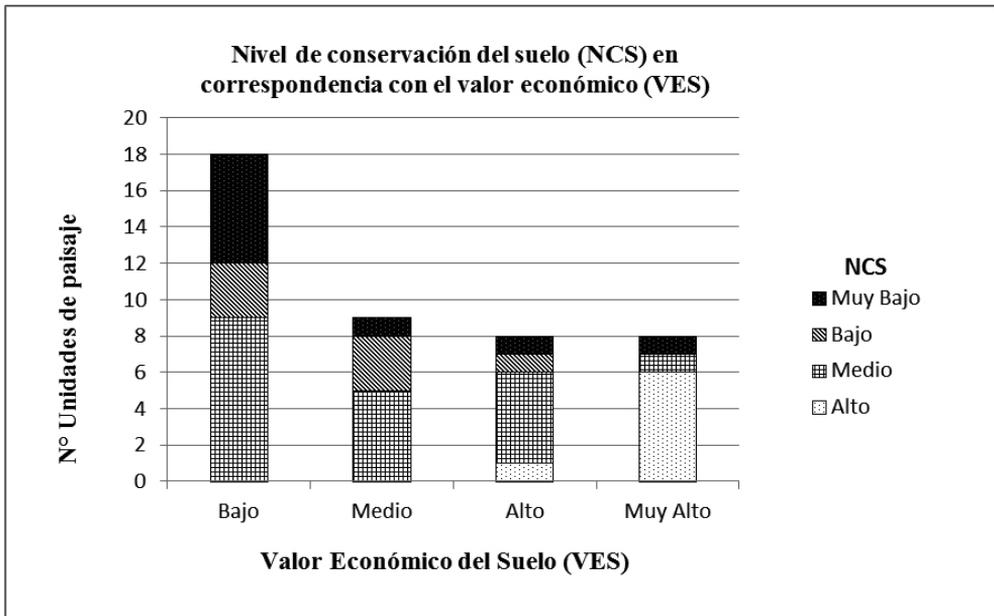


Figura 1. Número de unidades de paisaje distribuidas por niveles de conservación y valores económicos del suelo (NCS y VES).

el 23% del área estudiada, presentan niveles de conservación del suelo (NCS) muy bajos y bajos. Estas unidades presentan incidencia alta a media de procesos denudativos (PDS) e índices de calidad del suelo (ICS) predominantemente bajos. En el contexto de la microcuenca, estas UPs se encuentran en la parte baja de la microcuenca (2860 msnm), donde las pendientes son moderadamente escarpadas hasta escarpadas, con vegetación predominantemente herbácea y frecuentes manchas de suelo desnudo con evidente erosión laminar. En contraposición, se encuentran siete UPs que cubren el 24% de la superficie estudiada, las cuales presentan valores altos de NCS e ICS y ausencia de procesos denudativos; se ubican en la parte alta de la microcuenca (3040 msnm), donde son frecuentes las pendientes de baja inclinación, propiciando el desarrollo de sistemas productivos que alternan el cultivo de papa con la producción de leche en pastos mejorados. Las restantes 20 UPs que comprenden el 53% del área, presentan valores medios de NCS en correspondencia con valores intermedios de ICS y predominante baja intensidad de PDS, aunque en algunos casos se presente intensidad media. Estas unidades se encuentran más frecuentemente en relieves de pendientes moderadamente escarpadas a inclinadas; presentan la mayor heterogeneidad de cobertura en la cual predominan pasti-

zales pero se presentan numerosos parches pequeños de vegetación arbustiva densa o combinada con pastizales; estas coberturas se distribuyen ampliamente en toda el área de la microcuenca.

El comportamiento del valor económico del suelo por hectárea (VES) no presenta un claro patrón de correspondencia directa con el nivel de conservación del suelo en todos los casos. En la tabla 5 se relacionan estos dos atributos y puede apreciarse que todas las unidades de paisaje pertenecientes a predios con VES muy alto, presentaron también alto NCS; en el caso opuesto, la mayor parte de las unidades de paisaje (UPs) con bajo VES se distribuyen entre NCS medio y muy bajo, con un predominio del primero. La mitad de las unidades con menor VES no se encuentran dentro de los más bajos niveles de conservación del suelo. El caso particular de la UP que, aunque presenta alto VES, presenta muy bajo NCS, se explica en la medida que esa unidad hace parte de una finca con alto valor económico del suelo por hectárea, compuesta por varias unidades de paisaje, que presenta allí procesos de soliflucción plástica, microdeslizamientos y desplomes, pero no presenta deterioro del suelo en las demás unidades de paisaje que la conforman (Figura 1).

Tabla 4. Prioridades de Restauración del Suelo (PRS) en la microcuenca Santa Helena y sus principales atributos diagnósticos para 43 Unidades de Paisaje (UPs) consideradas en este estudio.

Prioridad Restauración Suelo (PRS)	Área estudiada (%)	Nº Ups	Índice de Calidad del Suelo (ICS)	Procesos Denudativos (PDS)	Nivel de Conservación Suelo (NCS)	Valor Económico del suelo /Ha (\$)
Muy Alta	18	10	Baja (6) Media (5)	Alto (7) Medio (3)	Muy bajo (7) Bajo (3)	Bajo (9) Medio (1)
Alta	5	5	Baja (4) Media (1)	Alto (2) Medio (3)	Muy bajo (2) Bajo (3)	Muy alto (1) Alto (1) Medio (3)
Media	54	20	Baja (3) Media (15) Alta (2)	Medio (3) Bajo (17)	Bajo (1) Medio (19)	Alto (6) Medio (5) Bajo (9)
Baja	24	8	Media (1) Alta (7)	Bajo (8)	Medio (1) Alto (7)	Muy alto (7) Alto (1)
Total UPs	100%	43				

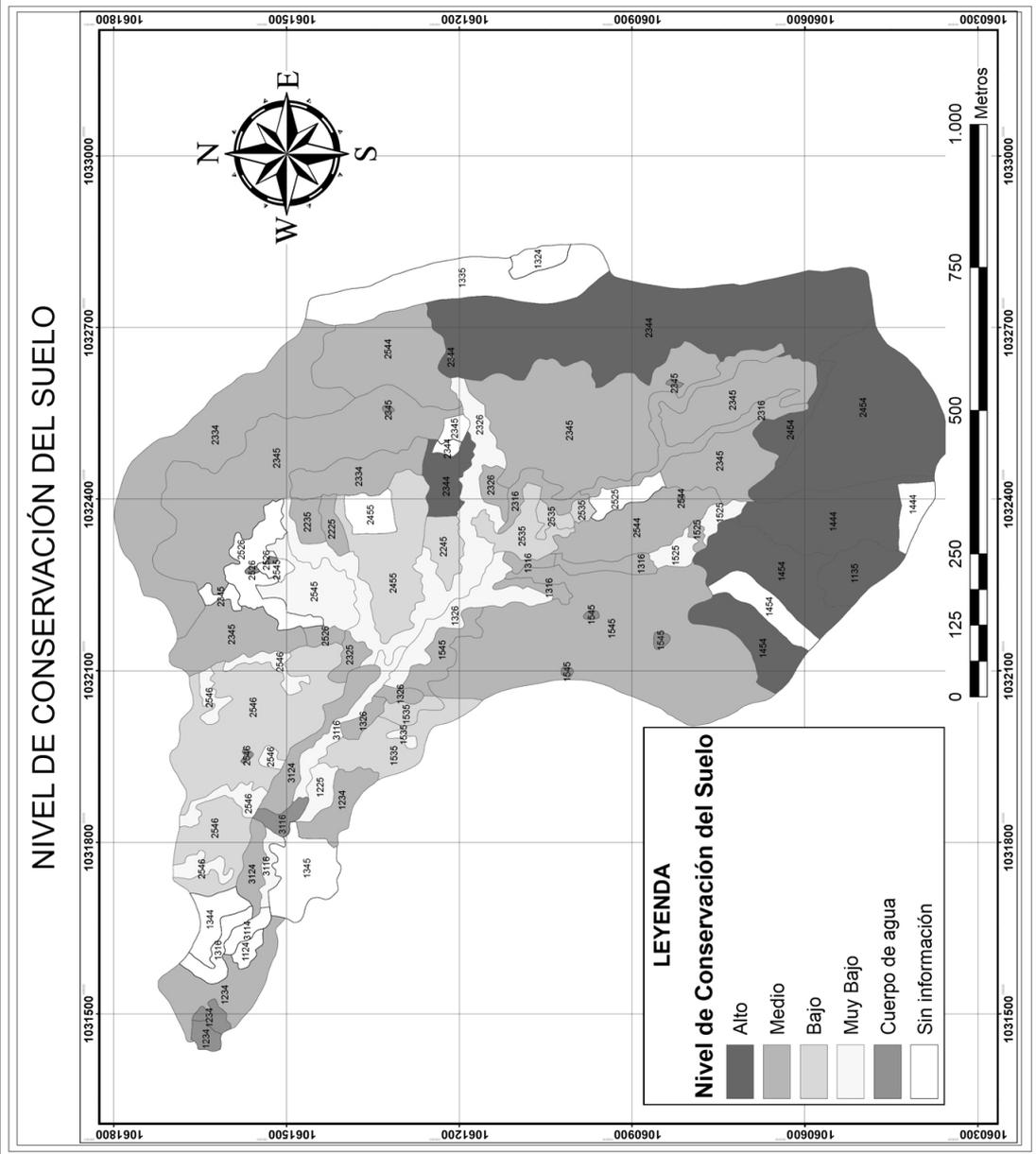


Figura 2. Mapa del nivel de conservación del suelo para las unidades de paisaje en la microcuenca Santa Helena. Las unidades en blanco no contaron con la información suficiente para realizar el análisis (Modificado de Valdés 2004).

La interpretación conjunta de los niveles de conservación del suelo (NCS) y el valor económico de cada suelo por hectárea (VES) en las unidades de paisaje permitió establecer prioridades de restauración ecológica del suelo (PRS), las cuales son resumidas y relacionadas con otros atributos importantes en la tabla 4, y se representan cartográficamente en la figura 4. Como se aprecia, el 23% del área estudiada se encuentra en condiciones que demandan una atención prioritaria muy alta o alta de restauración para el restablecimiento de los servicios ecosistémicos del suelo. El 24% se encuentra en condiciones buenas y, por tanto, ha sido considerado dentro de la categoría de baja PRS, aunque ello no quiere decir que no requiera de medidas de conservación que garanticen la permanencia o mejoría de las condiciones actuales de sus suelos. Las restantes 20 unidades de paisaje, que comprenden el 54% del área, presentaron características de deterioro suficientes para quedar incluidas dentro de la condición media de PRS.

DISCUSIÓN

La distribución de los valores de niveles de conservación del suelo (NCS) (Tabla 5) da una idea de la precaria condición de conservación en la que se encuentran los suelos y los servicios ecosistémicos que de ellos depende. Una confluencia de factores físicos y culturales (uso) dan como resultado que sólo el 24% del área cuente con condiciones altas de conservación; el 23% presenta ya un serio deterioro debido probablemente a la mayor inclinación de la pendiente ya que no puede decirse que haya, en toda el área de estudio, diferencias de uso tan fuertes que determinen contrastes fuertes en la intensidad de los procesos de degradación. En ese sentido, puede decirse que el mal uso del paisaje está relacionado con su aprovechamiento indiscriminado que no tiene en cuenta las limitaciones naturales que imponen condiciones particulares de

topografía que, en conjunción con el tipo de suelo y de materiales litológicos susceptibles, favorecen el desarrollo de procesos de deterioro de gran intensidad. Son frecuentes allí la erosión, soliflucción, microdeslizamientos y desplomes, que traen como consecuencia la pérdida irreversible del suelo o su estructura y, con ello, todos los beneficios de los servicios ecosistémicos que podrían proveer (Daily 1997, Westman 1977).

No obstante lo anterior, numerosas unidades de paisaje cuentan con la presencia de arbustos y pequeños arbustales que introducen modificaciones micro-ambientales favorables para los procesos edáficos, el desarrollo de una entomofauna edáfica más variada, mejores condiciones para percheo y nidación de aves y como refugio de anfibios y otros elementos de la fauna (Walker y del Moral 2003).

En las unidades de paisaje con NCS medio, la prestación de servicios, como soporte físico de las plantas, retención y liberación de nutrientes a las plantas y la regulación de los ciclos biogeoquímicos, no es la ideal, debido a condiciones restrictivas de pendiente que, aunque menos limitante que el caso anterior, aún son limitantes para el tipo de uso que se les da. Entre los aspectos favorables figura la presencia de coberturas arbustivas mezcladas con pastizales o la de arbustales enanos (50 cm o menos), que permiten que unidades de paisaje con relieves más escarpados presenten procesos de deterioro de menor intensidad y sean consideradas dentro de este NCS.

Las unidades de paisaje con NCS alto se definen principalmente por sus características topográficas favorables ya que, como se ha explicado, el uso del paisaje no muestra mayores preferencias que permitan diferenciarlo puntualmente; sin embargo, la baja inclinación y la mayor longitud de la pendiente configuran terrenos de mayor extensión, más propicios para actividades agropecuarias de mayor rendimiento y

posibilidades de sostenibilidad, donde no se evidencian procesos de degradación y se facilitan los procesos de desarrollo y conservación de servicios ecosistémicos del suelo. Estas condiciones pueden ser mejoradas mediante prácticas de conservación basadas en la restitución de nutrientes y materia orgánica, rotación de cultivos y potreros, y descanso apropiado de la tierra (Foth 1984).

El uso del atributo “diversidad de fauna edáfica” permitió identificar que, en las unidades de paisaje con alto y medio NCS, la presencia de coberturas homogéneas de pastos está asociada a una deficiente prestación de los servicios ecosistémicos, hábitat para entomofauna y eliminación de desechos y materia orgánica muerta. Esta condición, que es la más generalizada en estas categorías de NCS, se explica como consecuencia de tres procesos asociados a las actividades agropecuarias: (1) un aumento de la frecuencia y magnitud de perturbaciones; (2) una reducción de la cantidad y diversidad de recursos orgánicos devueltos al suelo y (3) el uso de compuestos xenobióticos como fertilizantes industriales y pesticidas (Beare *et al.* 1997, Giller *et al.* 1997).

Hay un fuerte contraste entre los NCS encontrados en la microcuenca de Santa Helena y la percepción y la valoración económica del suelo (VES) en los casos donde no son evidentes los extremos de deterioro o conservación del suelo. Esta peculiaridad ha sido tratada por Westman (1977) al explicar que, cuando la estructura de un ecosistema es fuertemente alterada sus funciones se deterioran y aparecen costos que normalmente no son considerados por la sociedad. Nuestros resultados muestran claras coincidencias entre NCS altos con VES altos y viceversa, pero para niveles intermedios de NCS, que corresponden al 53% del área estudiada, no hay una correspondiente valoración económica intermedia, lo cual induce a pensar que estos servicios ecosistémicos no son esenciales para la valoración económica.

En ese sentido, se hace también evidente en nuestro caso que los costos de disturbios lesivos, que equivalen al cálculo de las pérdidas económicas por la alteración en la prestación de servicios ecosistémicos del suelo, y los costos de restaurar el suelo (Jenkins *et al.* 2010), que en este estudio no se tuvieron en cuenta, no son contabilizados en los mercados y por tanto son considerados externalidades (Lomas *et al.* 2005). Adicionalmente, aspectos particulares de este estudio, como el hecho de haber tenido que asumir el mismo valor económico por hectárea para todas las unidades de paisaje que comprenden una misma propiedad aunque algunas presentaran niveles contrastantes de deterioro (bajo o muy bajo NCS), o el hecho de no haber podido obtener la valoración económica de algunos predios con sus verdaderos propietarios, son factores que introducen incertidumbre en la estimación del VES en algunos de nuestros casos.

Sin embargo, cuando la calidad de los servicios ecosistémicos es tan deficiente que se traducen en pérdidas económicas para las comunidades que habitan la región, esto se refleja en una menor valoración económica del predio y viceversa (Loomis *et al.* 2000). Esta condición es evidente en la microcuenca de Santa Helena cuando, para unidades de paisaje con menor NCS, el precio de venta del mismo es inferior al promedio del precio de venta de los predios con suelos conservados (VES más bajos) y aquellas con altos NCS presentan VES correspondientemente altos.

Tanto los NCS como los VES fueron utilizados para establecer un orden prioritario para el desarrollo de acciones de restauración ecológica en la microcuenca de Santa Helena. Aunque algunos enfoques sugieren tener en cuenta otros análisis (Cipollini *et al.* 2005), el valor económico del suelo (VES) reflejó, en cierta medida, la preocupación de los propietarios por mantener o recuperar los servicios ecosistémicos del suelo, que son la base fundamental de su bienestar.

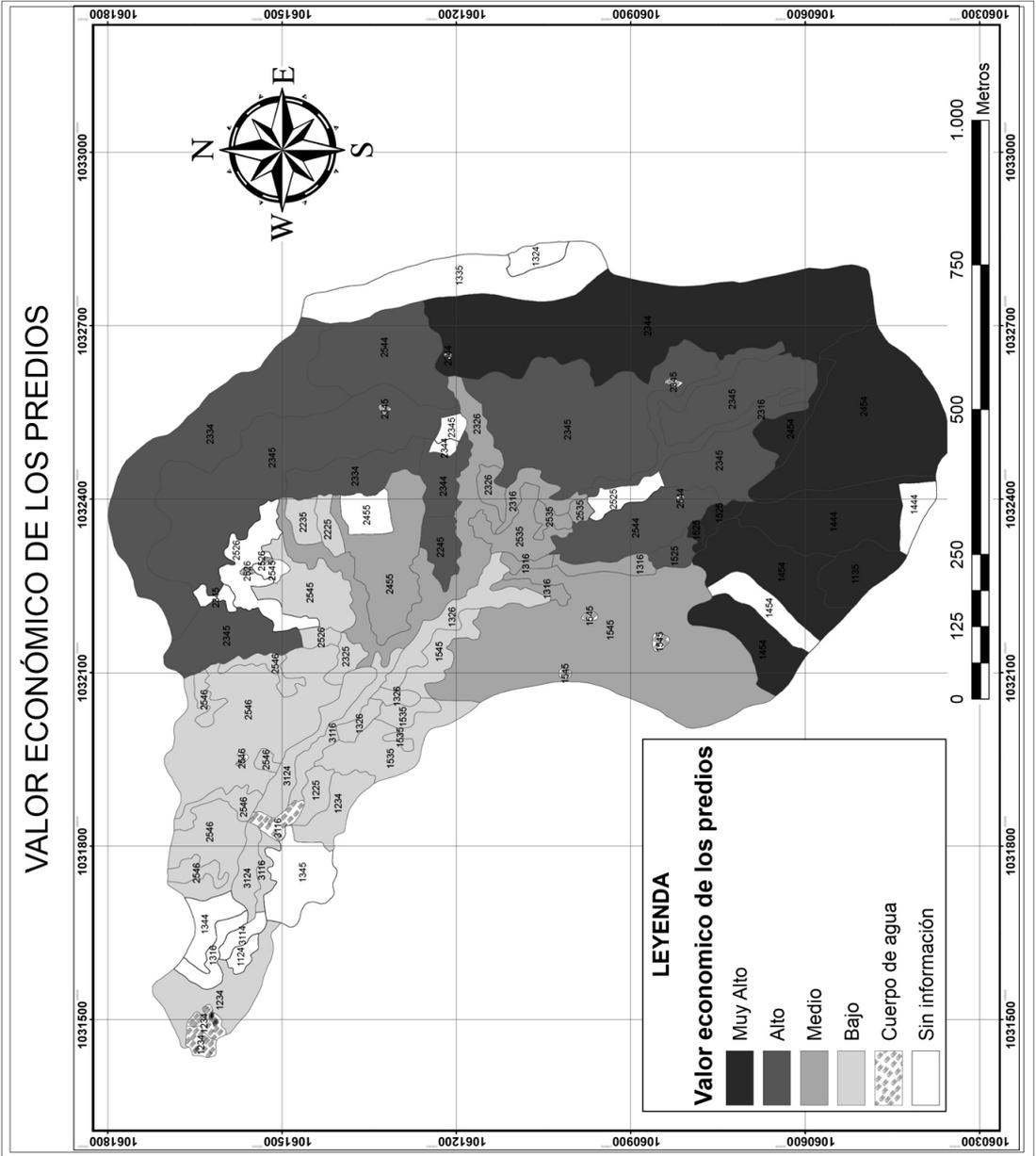


Figura 3. Mapa del valor económico de los predios por hectárea para cada UP. Las unidades en blanco no contaron con la información suficiente para realizar el análisis. (Modificado de Valdés 2004).

Tabla 5. Correspondencia entre el Valor económico del suelo (VES) con el Nivel de conservación del suelo (NCS) en 43 Unidades de Paisaje (UPs) muestreadas para la microcuenca Santa Helena.

Valor Económico del Suelo (VES)	NºUps	Area estudiada (%)	Nivel de Conservación del Suelo (NCS)			
			Alto	Medio	Bajo	Muy Bajo
Bajo	18	21	0	9	3	6
Medio	9	20	0	5	3	1
Alto	8	36	1	5	1	1
Muy Alto	8	23	6	1	0	1
Total UPs	43	100%	7	20	7	9

Con base en los criterios mencionados, se construyó el mapa de prioridad de restauración (figura 4), el cual guarda similitudes con el mapa del nivel de conservación del suelo (figura 2) en los casos extremos ya discutidos, donde el NCS y el VES guardan correspondencia. Las unidades de paisaje con mayor prioridad de restauración del suelo son aquellas que no están prestando servicios ecosistémicos eficientemente y generan pérdidas económicas a propietarios o usuarios. Contrariamente, las UP con baja prioridad son aquellas en las cuales se detectó un mejor desempeño de las funciones del suelo, con NCS más altos que definen buenas condiciones para el desarrollo de las actividades productivas.

CONCLUSIONES

Cerca del 23% del área de estudio presenta condiciones deficientes a muy deficientes en la prestación de servicios ecosistémicos del suelo, lo cual se manifiesta por un fuerte deterioro de la calidad del suelo ocasionado por la presencia de procesos de erosión y remoción en masa. Estas condiciones de deterioro mecánico de las unidades de paisaje se vieron agravadas por la coincidencia con características físico-químicas y biológicas deficientes en las propiedades que definen la calidad intrínseca de los suelos, lo cual es también una consecuencia de la dinámica de degradación detectada.

Las prioridades de restauración se establecieron atendiendo al nivel de conservación de los

suelos, de tal modo que aquellas con mayor condición de deterioro y menor valoración económica son aquellas calificadas como de mayor prioridad para la restauración. Del mismo modo, las prioridades más bajas de restauración se presentan en aquellas unidades que mostraron mejores condiciones de conservación y mejor calidad de sus suelos y comprenden el 24% del área estudiada. La estimación del valor económico del suelo (VES) presentó una utilidad limitada en la definición de prioridades intermedias de restauración ya que su comportamiento no muestra correspondencia con la condición de conservación de los suelos. Por ello, se considera que este índice refleja más unas expectativas de mercado que no valoran prioritariamente los niveles de conservación del suelo ni los servicios ecosistémicos que de ello se deriven, convirtiendo en externalidades todos los problemas de deterioro derivados del uso del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Pontificia Universidad Javeriana y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) al Proyecto N° 000826PUJ “Restauración ecológica de la microcuenca de Santa Helena, Municipio de Suesca (Cundinamarca)”, desarrollado en el marco del Convenio 184/2003, de cuyos resultados hace parte el presente artículo. También agradecen a la comunidad de la microcuenca Santa Helena por su disposición para colabo-

rar con el desarrollo de las actividades de esta investigación; a Luis Guillermo Baptiste, Uriel Murcia, Deyanira Vanegas y Mauricio Aguilar, como también a los examinadores anónimos de las versiones preliminares de este artículo, por sus comentarios y aportes.

LITERATURA CITADA

- ANÓNIMO. 1962. *Soil Survey Manual*. Soil Survey Staff. U.S. Department of Agriculture Handbook. (USDA). Washington, D.C.
- ANÓNIMO. 2002. *Valor del suelo en la sabana de Bogotá: estudio del valor del suelo en nueve municipios de la sabana*. Lonja de propiedad raíz de Bogotá (eds). Bogotá. 298 pp.
- ARONSON, J., C. FLORET, E. LEFLOC'H, C. OVALLE & J. PONTANIER. 1993. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. I. A view from the south. *Restoration Ecology* 1:8-17.
- ARONSON, J., S. MILTON & J. BLIGNAUT. 2007. *Restoring Natural Capital: science, business and practice*. Island Press. Washington, D.C. 400 pp.
- BARRERA, J.I., C. VALDÉS, A.C. MORENO, D.C. RONDÓN, N. MONTES, E.A. SARMIENTO, J. JIMÉNEZ, B. MIRANDA, V. CORSO, T.A. CÁRDENAS, M.C. COTES & A. CLAVIJO. 2004. Restauración ecológica de la microcuenca Santa Helena, Suesca, Cundinamarca. Informe Técnico. Pontificia Universidad Javeriana – Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Bogotá.
- BARRERA, J.I. & C. VALDÉS. 2007. Herramientas para abordar la restauración ecológica de áreas disturbadas en Colombia. *Universitas Scientiarum* vol 12. Número especial 2: 11-24.
- BEARE, M.H., M. VIKRAM-REDDY, G. TIAN & S.C. SRIVASTAVA. 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of decomposer biota. *Applied Soil Ecology* 6: 87-108.
- BEZDICEK, D.F., R.I. PAPENDICK & R. LAL 1996. Introduction: Importance of Soil Quality Health and Sustainable Land Management. In: Doran, J.W. & A.J. Jones (eds). *Methods for Assessing Soil Quality*: 1-8. Soil Science Society of America, Inc. United States of America.
- BINKLEY, D. & C. GIARDINA. 1998. Why do tree species affect soils? The warp and woof of tree-soil interactions. *Biogeochemistry* 42: 89-106
- CIPOLLINI, K.A., A.L. MARUYAMA & C.L. ZIMMERMAN. 2005. *Planning for restoration: A decision analysis approach to prioritization*. *Restoration Ecology* 13: 460-470.
- COSTANZA, R. & H.E. DALY. 1992. *Natural Capital and Sustainable Development*. *Conservation Biology*. 6: 37-46.
- COSTANZA, R. & B.C. PATTEN. 1995. *Defining and predicting sustainability*. *Ecological Economics* 15: 193-196.
- COSTANZA, R., R., D'ARGE, R. DE GROOT, S. FARBER, M. GRASSO, B. HANNON, S. NAEEM, K. LIMBURG, J. PARUELO, R.V. O'NEILL, R. RASKIN, P. SUTTON & M. VAN DEN BELT. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- COSTANZA, R., R., D'ARGE, R. DE GROOT, S. FARBER, M. GRASSO, B. HANNON, S. NAEEM, K. LIMBURG, J. PARUELO, R.V. O'NEILL, R. RASKIN, P. SUTTON & M. VAN DEN BELT. 1998. The value of ecosystem services: putting the issues in perspective. *Ecological Economics* 25: 67-72.
- COSTANZA, R., B. FISHER, K. MULDER, S. LIU & T. CHRISTOPHER. 2007. Biodiversity and ecosystem services: A multi-scale empirical study of the relationship between species richness and net. *Ecological Economics* 61: 478-491.
- DAILY, G. 1997. What are ecosystem services? En: Daily, G. (Ed). *Nature's Services: societal dependence on natural ecosystems*: 1-10. Island Press, Washington, D.C.
- DAILY, G. 2000. Management objectives for the protection of ecosystem services.

- Environmental Science & Policy 3: 333–339.
- DAILY, G., T. SODERQVIST, S. ANIYAR, K. ARROW, P. DASGUPTA, P. EHRLICH, C. FOLKE, A. JANSSON, B.O. JANSSON, N. KAUTSKY, S. LEVIN, J. LUBCHENCO, K.G. MÄLER, D. SIMPSON, D. STARRETT, D. TILMAN & B. WALKER. 2000. The value of nature and the nature of the value. *Science*. 289: 395-396.
- DORAN, J.W. & T. PARKIN. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J. & A. Jones (eds). *Methods for Assessing soil quality*: 25-37. Soil Science Society of America, Inc. Wisconsin.
- DORAN, J.W., A. JONES, M.A. ARSHAD & J.E. GILLEY. 1999. Determinants of soil quality and health. In: Lal, R. (ed.) *Soil quality and soil erosion*: 17-36. CRS Press. Florida.
- DORAN, J.W. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 119–127
- EHRENFELD, J.G. 2000. Defining the limits of restoration: the need for realistic goals. *Restoration Ecology* 8: 2-9.
- ETTER, A. 1998. Mapa general de ecosistemas de Colombia (1:2,000,000). En: Chaves, M.E. & N. Arango (eds). *Informe Nacional Sobre el Estado de la Biodiversidad en Colombia-1997*. Instituto Alexander von Humboldt, Bogota.
- ETTER, A., C. McALPINE, K. WILSON, S. PHINN & H. POSSINGHAM. 2006. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 369–386.
- FOTH, H.D. 1984. *Fundamentals of soil science*. New York. 435 pp.
- GILLER, K.E., M.H. BEARE, P. LAVELLE, A.-M.N. IZAC & M.J. SWIFT. 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Applied Soil Ecology* 6: 3-16.
- GÓMEZ, M.E. 1997. Evaluación de Sistemas de Producción de Árboles y Caña de Azúcar Enfatizando en el Suelo. Maestría en Desarrollo Sostenible de Sistemas Agrarios. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Bogotá D. C.
- HOBBS, R.J. & D.A. NORTON. 1996. Towards a conceptual Framework for Restoration Ecology. *Restoration Ecology* 4 No. 2: 93-110.
- JIMÉNEZ, J. 2006. Caracterización físico-química del suelo de la microcuenca Santa Helena, disturbada por uso agropecuario en el municipio de Suesca – Cundinamarca Trabajo de grado (Biólogo). Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C.
- JENKINS, A., B. MURRAY, R. KRAMER & S. FAULKNER. 2010. Valuing ecosystem services from wetlands restoration in the Mississippi Alluvial Valley. *Ecological Economics* 69(5): 1051-1061.
- LAL, R. 1994. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability. *Soil Tillage Res.* 27:1-8.
- LOMAS, P.L., B. MARTIN, C. LOUIT, D. MONTOYA, C. MONTES & S. ALVARES. 2005. Guía Práctica Para La Valoración Económica De Los Bienes Y Servicios Ambientales De Los Ecosistemas. Ulzama digital. Publicaciones de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez. España.
- LOOMIS, J., P. KENT, L. STRANGE, K. FAUSCH & A. COVICH. 2000. Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: results from a contingent valuation survey. *Ecological Economics* 33: 103-117.
- MENDOZA, J.E. & A. ETTER 2002. Multitemporal analysis (1040-1996) of land cover changes in the southwestern Bogotá highplain (Colombia). *Landscape and Urban Planning* 59: 147-158.
- NORBERG, J. 1999. Linkin nature's services to ecosystems: some general ecological concepts. *Ecological Economics* 29: 183-202.

- PALIK, B.J., P.C GOEBEL, L.K. KIRKMAN & L. WEST. 2000. Using landscape hierarchies to guide restoration of disturbed ecosystems. *Ecological Applications* 10(1): 189–202.
- PORTA-CASANELLAS, J., M. LÓPEZ-ACEVEDO & C. ROQUERO. 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 807 pp.
- PORTA-CASANELLAS, J., M. LÓPEZ-ACEVEDO & C. ROQUERO. 2003. *Edafología: Para la agricultura y el medio ambiente*. Tercera edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. 929 pp.
- POSTEL, S. & B. THOMPSON 2005. Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Natural Resources Forum* 29: 98–108.
- RONDÓN, D.C. 2007. Evaluación de la entomofauna presente en áreas disturbadas por uso agropecuario en la microcuenca Santa Helena (vereda El Hatillo, Suesca-Cundinamarca). Trabajo de grado (Ecóloga). Facultad de estudios ambientales y rurales. Universidad Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C.
- THOMPSON, L. 1978. *El suelo y su fertilidad: propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo en relación con su formación, clasificación y tratamientos desde el punto de vista de la fertilidad*. Editorial Reverte, S.A. Barcelona. 409 pp.
- VALDÉS, C. 2004. Zonificación biofísica de la microcuenca Santa Helena como criterio de heterogeneidad ambiental. En: Restauración ecológica de la microcuenca Santa Helena, vereda El Hatillo (Suesca – Cundinamarca). Informe final, Convenio 184/2003 CAR-PUJ.
- VILLOTA, H. 1991. *Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras*. IGAC. Bogotá. 184 pp.
- WALKER, L. & R. DEL MORAL. 2003. *Primary Succession and ecosystem Rehabilitation*. Cambridge University Press. United Kingdom. 442 pp.
- WESTMAN, W.E. 1977. How Much Are Nature's Services Worth?. *Science* 197: 960- 964.

Recibido: 30/07/2010

Aceptado: 25/04/2014