

Usos óptimos del suelo bajo enfoques ambientales y económicos

Optimal land use under environmental and economic approaches

*Camilo Restrepo Estrada**, *Mauricio Alviar Ramírez*

Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Antioquia. Calle 67 No. 53-108. A.A. 1226. Medellín, Colombia.

(Recibido el 10 de enero de 2012. Aceptado el 15 de octubre de 2013)

Resumen

La pérdida de suelo derivada de la actividad humana tiene impactos negativos en términos de pérdida de productividad y por lo tanto de ingresos debido a los sobrecostos asociados al mayor uso de fertilizantes como consecuencia de la pérdida de nutrientes y acumulación de carbono orgánico. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una herramienta metodológica que permita la valoración de los usos del suelo desde criterios medioambientales y económicos. Con el fin de observar las variaciones potenciales de pérdida de suelo y beneficio económico potencial en la cuenca del río Negro se usan la metodología RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation, por sus siglas en Inglés) y valoración económica de mercado mediante la herramienta SIG (Sistema de Información Geográfica) ArcGis 9.3. Los resultados obtenidos con el modelo SIG son procesados mediante técnicas de evaluación multicriterio. Mediante esta evaluación se encontró que los usos actuales del suelo para el año 2007, si bien representan un mayor beneficio económico para los agricultores y campesinos a corto plazo, no es una solución económica y ambientalmente óptima a largo plazo.

Palabras clave: Usos del suelo, erosión, Sistemas de Información Geográfica, Optimización multiobjetivo, RUSLE, oriente antioqueño

Abstract

Soil losses resulting from human activity have negative impacts in terms of loss of productivity and therefore income. In that sense, there is an overcost associated with the increased use of fertilizers as a result of the decrease of nutrients and organic carbon accumulation. The main objective of this paper is to develop a methodological tool to assess the optimal land use from an

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 2195836, fax: + 57 + 4 + 2191180, correo electrónico: milosos@gmail.com (C. Restrepo)

environmental and economic point of view. To observe potential variations of soil loss and potential economic benefits in the Negro river watershed, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) methodology and economic valuation of market prices was used coupled with Geographic Information Systems (GIS) tool (ArcGIS 9.3). The obtained results with the GIS model are processed using multi-criteria evaluation techniques. Results show that land use in 2007, even though it represents greater economic benefit for farmers and peasants in the short term, it is not an economical and environmental optimal allocation in the long-term.

Keywords: Land use, erosion, Geographic Information System, Multi-objective optimization, RUSLE, Antioquia's eastern

Introducción

La pérdida de suelos debida a la erosión no solo genera una degradación física del suelo, sino que se ve reflejada en el detrimento económico para los dueños de los predios, porque va ligada a la pérdida de nutrientes y materia orgánica, que a su vez debe ser compensada con fertilizantes, lo que genera sobrecostos para los agricultores [1-4].

La Constitución Política de Colombia, consagra el uso de los recursos naturales como uno de los derechos colectivos y del ambiente, y le asigna al estado la tarea de la planificación de su manejo y aprovechamiento, para garantizar su desarrollo sostenible, conservación, restauración o sustitución. Bajo esta premisa es necesario que las entidades territoriales cuenten con una serie de herramientas que contribuyan a tomar decisiones para garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales. Un ejemplo de esto es la ordenación del territorio en concordancia con los usos del suelo que permitan un aprovechamiento con criterios de sostenibilidad y que ayuden a encontrar soluciones a los problemas derivados de las actividades económicas.

En este trabajo se presenta una herramienta que permite determinar qué es lo más conveniente desde varios criterios para que el uso del recurso suelo sea sostenible, y que las personas que lo utilizan obtengan un beneficio que les permita maximizar su bienestar. Usando el modelo de estimación de la erosión RUSLE (Revised

Universal Soil Loss Equation) y un modelo de evaluación multicriterio (EMC) se logró combinar los parámetros físicos de la erosión con la valoración económica. Los resultados obtenidos plantean que se debe disminuir el uso agrícola en aproximadamente un 27% de la dedicación actual en este tipo de uso; también se debe disminuir el uso pecuario en un 38% del uso actual y aumentar en aproximadamente un 320% el uso forestal.

El artículo se divide como sigue. En una primera parte se desarrolla el marco teórico; en la segunda se describen la metodología y los datos utilizados; en la tercera se presentan los resultados y por último se concluye.

Marco teórico

La erosión es un proceso geológico natural que consiste en el desprendimiento de partículas debido a la acción del agua, del viento o del hombre, que las deposita en otro lugar. Los factores que influyen en la erosión son, entre otros: las pendientes, el clima, los usos inadecuados del suelo, el tipo de cubierta vegetal, los desastres naturales además de las propiedades físicas del suelo [2, 5].

Elección del modelo de erosión

La familia de modelos USLE (Universal Soil Loss Equation), RUSLE (Revised USLE) y MUSLE (Modified USLE) han sido ampliamente

debatidos como modelos universales de pérdida de suelos. Algunas de las críticas se fundamentan en su estructura estadística y en los parámetros que se incluyen en los modelos que si bien es cierto fueron calibrados para más de diez mil parcelas, éstas estaban limitadas al cinturón de maíz de los Estados Unidos y muy poco en suelos tropicales [2,6]. Se ha argumentado también que es un modelo que no tiene en cuenta los complejos procesos geológicos, hidrológicos y de interacción con el medio físico que lo rodea. De la misma manera, se ha logrado encontrar que el modelo sobreestima los valores reales de la erosión [2, 4, 6, 7].

Sin embargo, la revisión de la literatura presenta algunos argumentos a favor de la utilización del modelo RUSLE como estimador de la erosión. En efecto, es el método más usado en la literatura para la estimación de la erosión [3,4,6,8,9-14] y ha sido la base para desarrollar programas que estiman la erosión como el EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y la Universidad de Texas A&M.

Los factores involucrados en la expresión del RUSLE fueron mejorados usando datos de otras zonas del mundo, incluyendo suelos tropicales. Inclusive para muchos otros países y regiones ya existen expresiones que pueden ser usadas en el trópico y fueron desarrolladas y calibradas con parámetros específicos. Entre ellos se cuenta con trabajos que permiten calcular sus valores para Colombia [8,9,14-16].

Cuando no se cuenta con datos primarios de erosión en algunas zonas, los modelos paramétricos que usan en su mayoría información secundaria son válidos para tratar de resolver problemas erosivos o ambientales relacionados con los usos del suelo [10,11,17].

Cuando se va a utilizar un modelo para estudiar un problema determinado, su grado de complejidad, no garantiza mejores resultados si los datos de entrada no son los adecuados para el modelo y las hipótesis, entonces se deben escoger los modelos

de acuerdo a los datos disponibles e interpretar los resultados de acuerdo a las limitaciones de valores de entrada y los problemas inherentes al modelo [11,18].

Es por estos argumentos que se ha decidido escoger el modelo RUSLE para hacer una observar el potencial erosivo en la cuenca del río Negro.

RUSLE

El método de valoración de pérdidas de suelo más reconocido e importante es el que utiliza el modelo USLE, con todas sus revisiones y actualizaciones [1,6,19]. La ecuación RUSLE (ecuación 1) consiste en la multiplicación de una serie de factores que representan las causas principales y los atenuantes que contribuyen a la erosión del suelo; su forma funcional es:

$$A=RKLS\text{C}P \quad (1)$$

Donde:

A: Pérdidas de suelo en (t/ha/año).

R: Factor de erosividad debido a la lluvia (MJ/ha*mm/hr).

K: Factor de erodabilidad del suelo en (t/ha*MJ*ha/mm*hr).

LS: Factor topográfico (adimensional).

C: Factor de ordenación de cultivos (adimensional).

P: Factor de prácticas de conservación (adimensional).

Factor de erosividad de la lluvia (R)

Este factor representa el potencial erosivo de la lluvia que afecta el proceso de erosión de un suelo desprotegido; este factor surge de la observación que la energía cinética en combinación con la intensidad máxima a los 30 minutos podían explicar la mayor parte de la erosión debida a la lluvia [12,15,20].

Factor de erodabilidad del suelo (K)

Este factor cuantifica la facilidad con la cual el suelo es desprendido por las salpicaduras durante una lluvia o por el flujo superficial. Está relacionado al efecto integrado de la lluvia, escurrimiento e infiltración [3,21]. Este factor muestra la influencia que tienen los perfiles del suelo y sus componentes (arcillas, limos, arenas, materia orgánica) en la erodabilidad.

Factor topográfico ()

Es el producto de dos factores que están estrechamente ligados el uno con el otro, el factor de longitud de pendiente y el factor de inclinación de la pendiente [7]. Algunos autores han decidido proponer ecuaciones más sencillas que permitan calcular el valor de de manera conjunta y han validado sus resultados comparándolos con metodologías existentes, lo que ha permitido calcular este parámetro usando Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Factor de ordenación de cultivos ()

Este factor representa la relación de pérdida de suelo para una cobertura determinada, dividido por la pérdida del suelo sin cobertura [19]. Es un valor que tiene como función disminuir los valores de la pérdida de suelos debida a los usos que se le da a cada suelo; esto es, si el suelo está desnudo, el valor de este factor es uno, en la medida que el uso del suelo contribuye a evitar la erosión el valor disminuye hasta valores cercanos a cero [14].

Factor de prácticas de conservación ()

Es la relación de pérdida de suelo con prácticas de soporte a la pérdida correspondiente con labranza en pendiente, la cual tiene un valor de 1 [3]. Este factor es considerado en la ecuación como una variable independiente para las prácticas como cultivos a nivel, terrazas, cultivos en fajas, drenajes subsuperficiales, medidas de conservación en prácticas silvopastoriles [3,22]. Sin embargo, para otras prácticas de conservación

como rotación de cultivos herbáceos, tratamientos fertilizantes, cubiertas artificiales, entre otros, se consideran parte del factor C [22].

Erosión potencial tolerable

En la literatura se encuentran clasificaciones de suelos en los que se fijan criterios para la máxima pérdida de suelo tolerable, sin embargo estas clasificaciones no son muy homogéneas y se acostumbra a hacer dicha clasificación para cada trabajo específico, sin intentar unificar o fijar criterios que permitan ser utilizados de manera universal como punto de comparación.

Valoración económica de los recursos naturales

El principal problema con el que se enfrenta la economía es la asignación eficiente de los recursos escasos. Desde una perspectiva neoclásica se ha aceptado que el mercado con su sistema de precios es un mecanismo apropiado para asignar los recursos de manera eficiente. Sin embargo, para los recursos naturales no siempre el mercado resulta eficiente dadas las características de bienes públicos y sobre todo por las externalidades asociadas a ellos. En efecto, las externalidades se consideran fallos del mercado. Por ejemplo, la erosión de los suelos constituye una externalidad negativa toda vez que sus efectos reducen el bienestar no solo de quien la genera sino que también puede afectar el la productividad de otros predios aledaños e inclusive afectar la calidad y cantidad de agua en las quebradas cercanas al predio afectado. En este contexto, resulta necesario cuantificar la erosión tanto en términos físicos como monetarios para lograr una mejor asignación del recurso suelo en aquellos usos que minimicen el impacto de la erosión [23].

Es necesario valorar económicamente los recursos naturales por varios motivos. En primer lugar, para corregir los fallos del mercado [24]; segundo, es la inclusión de los impactos del uso de los recursos naturales que al ser valorados logran ser toma en cuenta aspectos que afectan la calidad

de vida y el bienestar económico de las personas [25]; el tercer motivo es que las acciones que afectan los bienes y servicios ambientales, traen consigo graves problemas en los ecosistemas que se ven reflejados en su sobreexplotación por la inexistencia de lineamientos y valoraciones que permitan tomar decisiones acertadas [25].

Las políticas de conservación de suelos y asignación sostenible pueden ser justificadas desde dos puntos de vista. El primero es que las señales de mercado no ayudan a cerrar la brecha entre valor social y privado, esto significa que los agentes toman decisiones sin tener en cuenta el detrimento en el bienestar de la sociedad que generan con sus decisiones. El segundo es que la conservación de los suelos de manera sostenible tiene incorporada su naturaleza de largo plazo y los individuos tienden a favorecer las decisiones de corto plazo [4]. En síntesis, la erosión de los suelos es una externalidad negativa pero también representa una reducción de un insumo clave para la producción que es justamente el suelo. Es decir, hay efectos *in-site* y *off-site*.

Los agricultores no modifican sus prácticas de manejo a menos que éstas beneficien directamente sus intereses económicos. En general los agricultores, particularmente los más pobres, no tienen en cuenta los efectos que la erosión tiene *in situ* mucho menos los efectos externos que afectan al resto de la sociedad [4].

Evaluación multicriterio y multiobjetivo (EMC)

El objetivo principal de las técnicas EMC es ayudar al decisor a elegir entre objetivos que están en competencia y conflicto; estos objetivos pueden ser económicos, ambientales, sociales, técnicos, estéticos, institucionales, entre otros. [26].

El proceso de aplicación de una determinada metodología de análisis multiobjetivo se puede resumir en una serie de pasos a seguir. El primero de ellos es definir y evaluar el problema de

interés con todas sus características; el segundo es seleccionar las técnicas EMC apropiadas para darle solución al problema; el tercero es aplicar las técnicas seleccionadas, comparar las clasificaciones obtenidas, y realizar análisis de sensibilidad y el cuarto seleccionar para estudios adicionales las alternativas clasificadas sistemáticamente como mejores por las diferentes técnicas [26].

En la literatura se pueden encontrar diversas metodologías EMC, para el trabajo se utilizaron el método de los promedios ponderados, el método de la programación por metas y el método de la programación por compromiso; estas metodologías fueron aplicadas mediante el uso del Sistema de Análisis Multiobjetivo (SIAM).

Metodología

En la construcción del modelo de optimización multicriterio de usos del suelo se tienen en cuenta dos objetivos, el económico y el ambiental; el primero representado por la maximización del beneficio económico en la cuenca y el segundo minimizando las pérdidas de suelo en la misma. Estos objetivos compiten entre sí; esto es, si se minimiza la pérdida de suelo, disminuyen los beneficios y si se maximizan los beneficios, la pérdida de suelos aumenta.

El modelo fue probado bajo dos escenarios, el primer escenario se denominó “mayor beneficio” para el cual se partió del uso de mayor beneficio económico (eso equivale a que todas las celdas activas se asignaron al principio de las iteraciones como de uso agrícola). En cada iteración se cambiaron solo las celdas con problemas de erosión (por encima de la permisible) por el siguiente uso con mejor beneficio asociado y se recalcula el beneficio total de la cuenca. Las iteraciones finalizaron cuando todas las celdas presentaron erosión por debajo de la permisible o cuando el modelo asignó una celda como de uso del suelo forestal debido a que es el que menor erosión representa.

El segundo escenario se denominó “de usos actuales”, en este se partió de los usos actuales para 2007; se calcularon en cada paso los beneficios y la erosión; en cada iteración se cambió el uso de las celdas que superen la erosión permisible por la siguiente con mayor beneficio y menor valor de erosión (representadas en un menor valor del factor de cobertura de suelos C).

El beneficio y la erosión estimados por el modelo corresponden a aproximaciones potenciales y no a valores exactos.

Datos espaciales

Los datos espaciales utilizados en este trabajo fueron suministrados por la Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare (CORNARE) y corresponden en formato *shape* a usos del suelo 2007 con escala 1:25.000; ríos con escala 1:50.000; vías con escala 1:50.000; construcciones con escala 1:1:25.000 y en formato *raster* DTM (Digital Terrain Model) con píxeles de 30m por 30m.

Descripción de la zona de estudio

La cuenca del río Negro se encuentra localizada en el sur-oriental del departamento de Antioquia, Colombia. Al interior de esta cuenca se encuentran nueve municipios (Carmen de Viboral, La Ceja, Rionegro, El Retiro, El Santuario, Guarne, Marinilla, San Vicente y El Peñol) [4,27]. La cuenca tiene 95000 hectáreas aproximadamente (datos suministrados por CORNARE), Según el censo de 2005 la población en la cuenca es de aproximadamente 350 mil personas [28].

Después del Valle de Aburrá, el oriente antioqueño se presenta como la región económicamente más dinámica del departamento. Así, el 70% de la economía de la subregión se concentra en el oriente cercano que está caracterizado por una buena infraestructura física como son las

redes de servicios públicos domiciliarios, un aeropuerto internacional, densidad y calidad de vías de interconexión intra-regional, con la región metropolitana y con el resto del país. Además, en esta región se concentran seis embalses y cinco centrales hidroeléctricas que generan casi un tercio de la energía nacional y tres cuartas partes de la energía departamental [28,29].

En la estructura económica de la región las actividades agropecuarias y la silvicultura participan con el 25% (segundo puesto después de los servicios) y son cerca del 15% del sector agropecuario departamental [29]. Su producción está dirigida a los mercados del centro del país y al abastecimiento del Valle de Aburrá, y es una de las más importantes despensas alimentarias para la región metropolitana [4,28,29]. Para el año 2007 los usos del suelo en la cuenca eran agrícolas, pecuarios, forestales, uso urbano y grandes cuerpos de agua. Los usos agrícolas son cultivos transitorios (papa, maíz, frijol, tomate, hortalizas) y de manera marginal algunos cultivos permanentes (brevo, aguacate, tomate de árbol y otros frutales) y viveros de plantas ornamentales e invernaderos para la producción floral [4,28,29].

Los bosques en la región son tanto naturales, como plantados y tienen fines comerciales y de protección; los bosques naturales se encuentran en los lugares más quebrados y altos de la región, por lo que cumplen con funciones conservacionista y de embellecimiento del paisaje; estos bosques naturales aun conservan biodiversidad y heterogeneidad a pesar de la presión ambiental ejercida en toda la región [27]. Los otros usos del suelo corresponden a edificaciones tanto urbanas como rurales, a cuerpos de agua que corresponden a embalses y lagunas y por último, aparecen algunas tierras eriales que han perdido el suelo en su totalidad por diferentes causas (por ejemplo canteras) [4,27]. En la figura 1 se muestran los usos para el 2007.

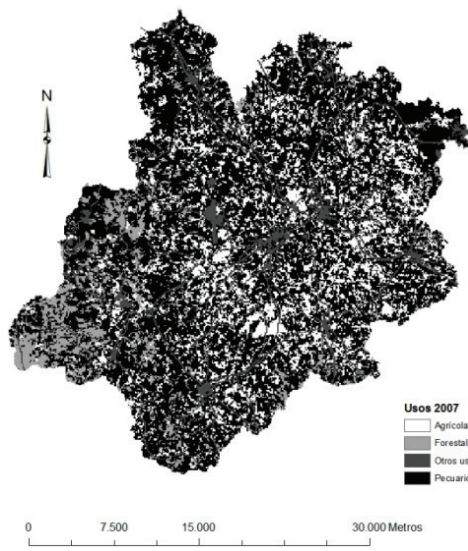


Figura 1 Usos del suelo 2007. Fuente: CORNARE

Datos del modelo de erosión

Para medir la pérdida de suelos en la cuenca se tomó el modelo RUSLE (ecuación 1) y se calcularon cada uno de los parámetros según se describe a continuación.

En Colombia, Pérez y Mesa (2002) [15] propusieron una ecuación para el cálculo del

$$K = (1/7,594) * [2,1 * 10^{-4} * (12 - OM) * M^{1,4} + 3,25 * (St - 2) + 2,5 * (p - 3)] / 100 \quad (4)$$

Donde:

K: Factor de erodabilidad del suelo en (t/ha*MJ*ha/mm*hr).

OM: Materia orgánica (%).

St: Código de la estructura del suelo.

p: Código de permeabilidad.

M: (%limo+%arena muy fina)*(100-%arcilla)

Los resultados de este factor arrojaron un único valor por tipo de suelo en el oriente antioqueño según la clasificación suministrada por CORNARE (1998) [4].

Para el parámetro *P* se asumió un valor constante de 1, ya que se consideró que los cultivos

factor de erosividad de la lluvia en el país, usando la información de 140 estaciones; como resultado obtuvieron dos expresiones, una lineal (ecuación 2) y una potencial (ecuación 3) con coeficientes de correlación de 0,91 y 0,88; respectivamente. Las expresiones presentadas en el trabajo son:

$$R = -8,831 + 0,0071263PMA \quad (2)$$

$$R = 0,001193PMA^{1,70148} \quad (3)$$

Donde:

R: Factor de erosividad debido a la lluvia (MJ/ha*mm/hr).

PMA Precipitación media anual (mm/año).

Esta metodología requería información de la precipitación promedio que se obtuvo de estaciones meteorológicas en la zona de estudio tomadas de Velez y Smith (1997) [30], a las cuales se les aplicó una interpolación spline mediante ArcGis 9.3. Dicha interpolación usa métodos polinomiales y de mínimos cuadrados y es útil cuando se trata de superficies que varían suavemente.

Los valores de se calculan con el nomograma de erodabilidad del suelo (ecuación 4).

tradicionales que predominan en la cuenca no tienen en cuenta las prácticas de conservación.

Para el cálculo del factor *LS* Barrios (2000) [9] propone dos ecuaciones desarrolladas para regiones tropicales, son continuas y aplicables a cada pixel con un r^2 de 0,99 para los trópicos.

$$LS = 0,009s^2 + 0,0798s \text{ para } s \leq 30\% \quad (5)$$

$$LS = 0,2558s + 3,248 \text{ para } s > 30\% \text{ para } \quad (6)$$

Donde:

s: Valor de la pendiente en porcentaje.

En la tabla 1 se muestran algunos valores recomendados para *C* en la literatura, que es la variable en el modelo erosivo.

Tabla 1 Factor

<i>Cobertura</i>	<i>Factor</i>
Construcción y cuerpos de agua	0,000
Bosques	0,001 – 0,003
Matorral denso	0,003 – 0,030
Matorral claro	0,030 – 0,010
Suelo desnudo	1,000
Maíz	0,060 – 0,700
Papa	0,260 – 0,615

Fuentes: [3,15,19]

Se tomaron valores de 0,001 para el uso bosques, 1 para usos eriales, 0,090 para el uso pastos y 0,400 para el uso cultivos. Debido a las características de los datos de usos del suelo con los que se contó (usos actuales 2007) que fueron suministrados por CORNARE, donde no se diferenciaban entre tipos de cultivos y sabiendo que la mayoría del suelo agrícola se emplea entre dos usos principales papa (30% sobre el uso espacial total de los cultivos de la cuenca y el 71% de la producción de papa a nivel departamental) y maíz (22% del uso espacial total de la cuenca) aunque los otros cultivos tienen el 48% del total, se tomaron solo estos dos cultivos por el peso económico y las implicaciones sociales y

culturales en la región [4,31]. Se consideró un solo uso agrícola llamado cultivo tradicional en el cual se promediaron los valores de C para papa y maíz y reportados en la tabla 1. El valor del cultivo tradicional tomado fue de 0,400.

Para la tolerancia a la pérdida de suelos para Colombia, Almonza y otros (2009) [20] propuso la clasificación que se presenta en la tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de la degradación por erosión

<i>Clase de degradación</i>	<i>Pérdida de suelo (Ton/Ha/Año)</i>
Ninguna ó ligera	< 10
Erosión baja	10-25
Erosión moderada	25-50
Erosión alta	50-100
Erosión muy alta	> 100

Fuente: [32]

Se tomó como valores tolerables para el modelo inferiores a 20 ton/ha/año valor que aparece en la literatura como pérdida baja a moderada [32,33].

En la figura 2 se muestran los mapas de erosividad, erodabilidad y del factor LS que permanecen constantes para todas las iteraciones.

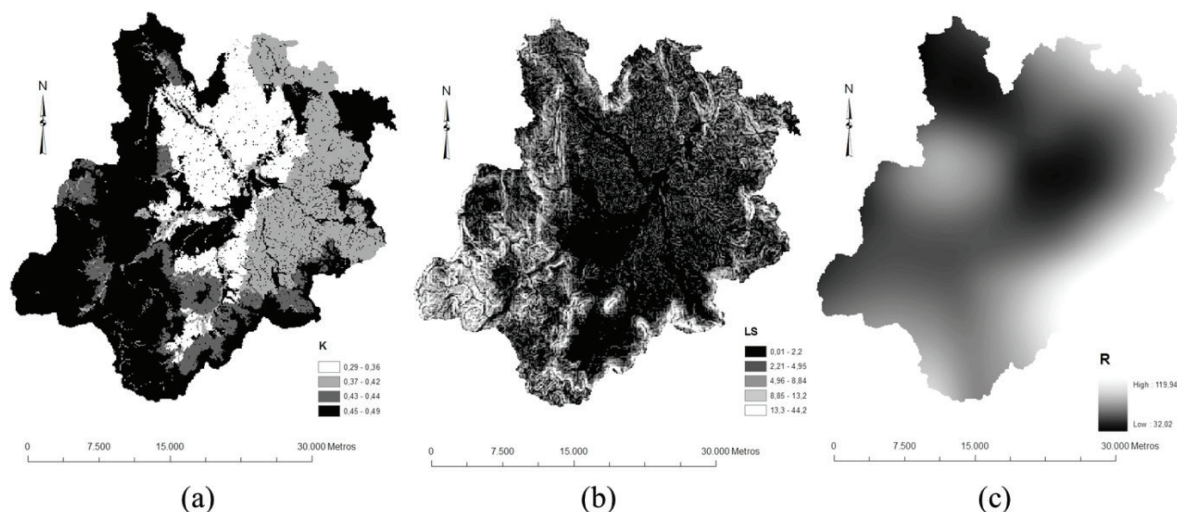


Figura 2 Parámetros del modelo. (a) erodabilidad, (b) factor LS y (c) erosividad

Datos modelo económico

El modelo económico se puede clasificar como un modelo de valoración indirecta basado en precios de mercado. Para este modelo se consideraron tres usos que reportan beneficios económicos: uso agrícola, uso pecuario y uso forestal.

Uso agrícola

Para valorar económicamente el uso agrícola se utilizó el mercado existente, además de los rendimientos de los productos para la región, datos que se encuentran disponibles en el anuario estadístico del sector agropecuario [31]. El cultivo

tradicional se realizó mediante un promedio ponderado que depende de las hectáreas empleadas en el cultivo de cada uno de los productos en la región, la idea era poder tener un cultivo que representara los usos de tal manera que mostrara los impactos económicos además que se pudiera representar en el modelo erosivo. La distribución del uso agrícola se explicó en el cálculo de en el modelo de erosión. En la tabla 3 se muestran los datos que se usaron para la valoración económica directa con precios y costos de mercado y se proyectaron del año 2008 hasta el 2010 con el uso del (IPC) de los años 2009 y 2010, que fueron de 7,67% y 2% respectivamente

Tabla 3 Cálculo de los beneficios económicos del uso agrícola

Cultivo	Rendimiento (Kg/ha)	Costos (\$/kg)	Ingreso (\$/kg)	Beneficio Neto 2008 (miles\$/ha)	Beneficio Neto 2009 (miles\$/ha)	Beneficio Neto 2010 (miles\$/ha/año)
Papa	14.846	529	1.032	7.467,5	8.040,3	8.201,1
Maíz	1.450	540,5	715	253	272,4	277,9
Cultivo tradicional	9.771	533,4	911,9	3.698,8	3.982,5	4.062,1

Fuentes: Cálculos basados en datos tomados de [31]

Uso pecuario

Para el uso pecuario se encontró que en la cuenca la gran mayoría del ganado es usado para producción lechera y por tanto no se consideraron

los beneficios recibidos por el concepto de producción de carne [31,34]. En la tabla 4 se muestran los valores tomados para calcular el beneficio potencial pecuario.

Tabla 4 Cálculos de los beneficios económicos del uso pecuario

Uso pecuario	Capacidad de carga (unidades/ha)	Producción (lt/bovino/día)	Días de producción lechera anual	Precio (\$/lt)	Costos (\$/ha/año)	Utilidad Neta (miles\$/ha/año)
Producción de leche	1,35	16,6	305	807,2	1.608.400	3.186,4

Fuentes: Cálculos basados en datos tomados de [31,34]

Uso forestal

El enfoque forestal corresponde a la maximización del Valor Actual Neto (VAN). Los datos fueron suministrados por la reforestadora Doña María para una hectárea típica en esta región; aunque los años a los que se refieren los precios y los costos son diferentes. Los precios suministrados corresponden al año 2007 y los costos corresponden al año 1998 y fueron actualizados mediante el IPC. El precio de la madera para los cálculos fue de \$ 101000 por metro cúbico y se tomó como tasa de descuento el 1%; los costos varían según el año. La ecuación de crecimiento (ecuación 7) suministrada corresponde a la especie *Eucalyptus Saligna* (denominado

también *Eucalyptus Grandis*), esta ecuación de crecimiento es variable con el índice de sitio y con la edad de la plantación [35].

$$\log V = 2,38002 - \frac{4,446092}{t} + 0,00783 * IS + 0,13675 * IS * t \quad (7)$$

Donde:

V: es el volumen de la madera en m³/ha.

t: Edad del eucalipto en años.

IS: Índice de sitio, para este trabajo se utilizó el valor 17.

En la tabla 5 se muestra el cálculo del valor de uso forestal que maximiza el VAN.

Tabla 5 Cálculo del VAN para el caso de Eucalypto Saligna

Edad (años)	Volumen (m ³ /ha)	Ingreso (\$/ha)	Costos (\$/ha)	Beneficio Neto (\$/ha)	VAN (\$/ha)	VAN Anualizado (\$/ha/año)
22	260,6	26.324.051,8	148.447,4	26.175.604,5	21.029.381,4	955.881,0

Fuente: Cálculos basados en datos suministrados por reforestadora Doña María

Integración de los modelos de erosión y de beneficios

Mediante el uso de la herramienta ModelBuilder del ArcGis 9.3 se integran los modelos de pérdida de suelos y de beneficios económicos potenciales, los factores *P*, *LS*, *K* y *R* permanecen constantes variando únicamente el factor *C*. El uso del suelo se modifica hasta encontrar una distribución espacial de tal manera que la pérdida potencial de suelos sea inferior a 20 ton/ha/año. El modelo opera hasta que todas las celdas presenten una pérdida potencial menor a esta o hasta que el suelo presente uso forestal que es el que menor pérdida potencial de suelo genera. Los resultados fueron 21 alternativas de uso cuyos datos son la distribución espacial de los usos según la pérdida requerida, la pérdida potencial del suelo calculada mediante la RUSLE y los beneficios potenciales asociados a esta distribución de usos. Dichos resultados alimentaron los modelos de EMC donde se seleccionaron las mejores alternativas.

Resultados

Escenario usos actuales

De los resultados arrojados por el programa SIAM se puede extraer que las dos mejores alternativas son las 7 y 8 que corresponden a pérdidas potenciales de suelo por hectárea de 6 y 7 ton/ha/año respectivamente, figura 3.

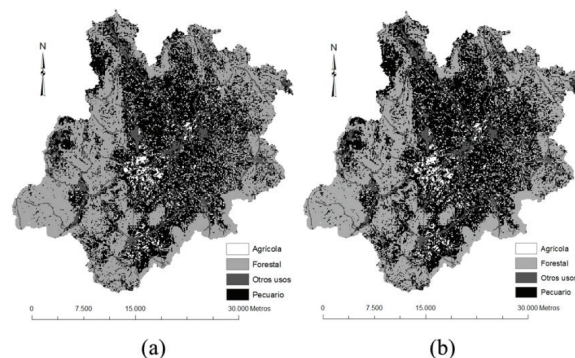


Figura 3 (a) alternativa 7, (b) alternativa 8

Se puede observar que para los dos escenarios seleccionados por los modelos EMC la distribución espacial de los usos varía considerablemente con respecto al uso actual (figura 1) que está basado, casi en su totalidad, en usos agrícolas y pecuarios. Acá el modelo recomienda, redistribuir los usos de tal manera que las zonas con mayor pendiente de la cuenca, que se encuentran en la periferia de la zona de estudio, deberían modificar su uso, casi exclusivamente, a cobertura forestal, dejando los usos pecuario y agrícola solo al interior de la cuenca y más cerca de los centros poblados que son zonas con pendientes menores.

Comparando la pérdida potencial de suelos de los usos actuales de 2007 y las alternativas mejor evaluadas por los modelos EMC, ver tabla 6, la mejora está entre el 86% y el 88% mientras que el detrimento potencial económico se encuentra entre el 29% y el 33%. Esta pérdida potencial

económica se debe a la brecha entre bienestar social de largo plazo (mejorar las condiciones ambientales en la cuenca) y bienestar individual (aumentar ingresos potenciales) en el corto plazo.

Para este escenario se observa en la tabla 6 que los EMC sugieren que el uso agrícola debe pasar a ser alrededor del 21% y para el uso pecuario debe disminuir un 28% con respecto a sus usos actuales. Mientras que para el uso forestal se debe pasar a magnitudes de uso entre 4.5 y 5 veces más altas.

Escenario mayor beneficio

Para este escenario las EMC escogen las alternativas 7, 8 y 9 que corresponden a pérdidas potenciales de suelo de 6, 7 y 8 ton/ha/año respectivamente (figura 4).

Tabla 6 Datos escenario usos actuales

<i>Alternativa</i>	<i>Pérdida potencial de suelos (ton/ha/año)</i>	<i>Beneficios potenciales (millones de \$/ha/año)</i>	<i>Agrícola (ha)</i>	<i>Pecuario (ha)</i>	<i>Forestal (ha)</i>
Usos 2007	1'130.933	273.074	19.817	57.883	8.538
pérdida de 6	134.814	184.209	3.904	40.197	42.137
pérdida de 7	163.148	193.497	4.551	43.461	38.226

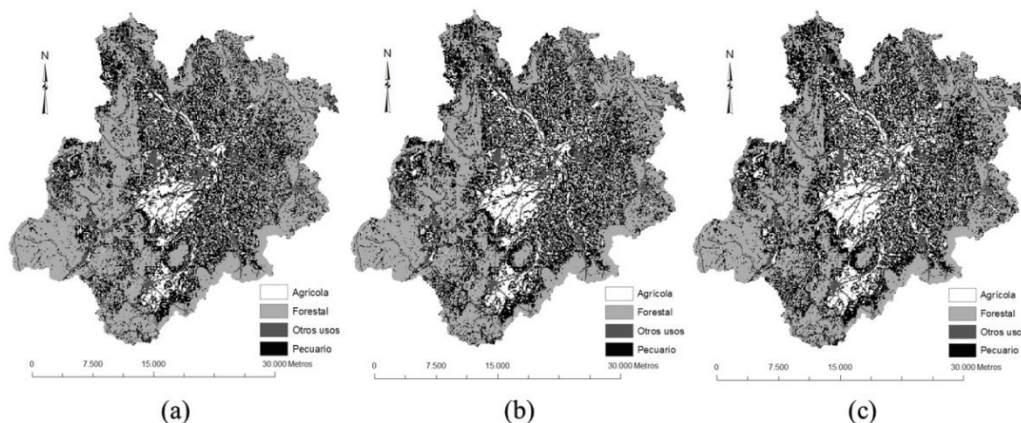


Figura 4 Escenario de mayor beneficio (a) alternativa 7, (b) alternativa 8 y (c) alternativa 9

En la tabla 7 se muestran las tres alternativas mejor evaluadas por el modelo multicriterio y multiobjetivo comparadas con los usos actuales de 2007; para el caso de la pérdida potencial de suelos el modelo muestra una posible mejora del orden del 83%, con una disminución de beneficios de alrededor del 24%. Debido a

que el modelo parte de maximizar los ingresos potenciales de cada individuo y modifica las celdas que presentan problemas erosivos, se observa una menor pérdida potencial de beneficios con valores de reducción potencial de pérdida de suelos similares al escenario de usos actuales.

Tabla 7 Datos del escenario Mayor Beneficio

<i>Alternativa</i>	<i>Pérdida potencial de suelos (ton/ha/año)</i>	<i>Beneficios potenciales (millones de \$/ha/año)</i>	<i>Agrícola (ha)</i>	<i>Pecuario (ha)</i>	<i>Forestal (ha)</i>
Usos 2007	1'130.933	273.074	19.817	57.883	8.538
pérdida de 6	163.132	196.088	12.254	33.894	40.090
pérdida de 7	201.505	207.544	14.414	36.023	35.801
pérdida de 8	240.104	217.295	16.556	37.412	32.270

Los resultados del modelo plantean que se debe disminuir el uso agrícola en aproximadamente un 27% de la dedicación actual en este tipo de uso; también se debe disminuir el uso pecuario en un 38% del uso actual y aumentar en aproximadamente un 320% el uso forestal. Estos valores son consistentes con el escenario de usos actuales, lo cual significa que se debería pensar en aumentar el uso forestal a lo largo de la cuenca.

Conclusiones y recomendaciones

El modelo de predicción de la erosión aplicado en este trabajo de investigación a pesar de tener muchas limitaciones de información, permite encontrar problemas potenciales de erosión que, si bien sus magnitudes pueden diferir de las magnitudes reales, son una aproximación válida en condiciones de escasez de datos.

El modelo muestra que el aprovechamiento forestal debe pasar a ser el principal uso en la cuenca del río Negro si se tienen en cuenta restricciones erosivas que ayudan a mejorar el bienestar en su conjunto.

Se puede observar que el uso actual del suelo obedece a criterios netamente económicos de corto plazo que ocultan los verdaderos costos

sociales de largo plazo los cuales permitirían una mejor toma de decisiones para lograr la sostenibilidad y no comprometer la productividad y los ingresos futuros provenientes del manejo adecuado de los suelos. En este sentido, se debe empezar a destinar muchos más recursos para determinar la real magnitud de los problemas ambientales que pueden llevar a la pérdida de bienestar en la sociedad, no solo en términos de erosión potencial, sino en términos de pérdida de productividad del suelo y por lo tanto de ingresos presentes y futuros.

De otro lado, es ampliamente conocido que la erosión reduce la vida útil de los embalses debido a la colmatación producida por los sedimentos que llegan a ellos. La pérdida de ingresos potenciales puede llegar a compensarse mediante ingresos debidos a sedimentación evitada en la zona; para esto habría la necesidad de medir los costos evitados de sedimentación y mirar en cuanto se reducen los costos de mantenimiento en los embalses y destinar parte de estos recursos evitados a compensar a los dueños de la tierra que estarían obligados a desarrollar actividades que generen menor erosión.

Las señales del mercado por si solas no garantizan disminuir la brecha entre beneficio social y

beneficio privado por lo tanto las personas encargadas de tomar decisiones deben propender por tomar medidas que mitiguen el impacto de los usos del suelo en el bienestar colectivo vía incentivos a los dueños de los suelos o a los productores. Estas medidas pueden ser directas en forma de subsidios a actividades menos erosivas, implementos agrícolas, árboles, semillas, ganado entre otros y/o indirectas como asistencia técnica, o reducciones de impuesto predial como compensación por actividades menos erosivas.

Se recomienda mejorar los datos de erosión y sedimentación para poder aplicar y validar modelos que representen, de una mejor manera, los problemas que potencialmente se muestran en la cuenca del río Negro. En este sentido, se puede aprovechar la experiencia y conocimientos que tiene CORNARE como entidad encargada de velar por la conservación de los recursos naturales. De la misma manera, para las empresas generadoras de energía hidroeléctrica resulta de gran importancia apoyar los programas de conservación de suelos para mantener la vida útil de los embalses ubicados en la zona de estudio (Ley 99 de 1993).

Se recomienda integrar un modelo hidrológico dentro de la evaluación debido a la importancia del agua no sólo por los procesos erosivos y sedimentológicos, sino por las complejas interacciones entre el medio físico y su clima que generan el cambio en patrones de lluvia, infiltración y escorrentía, entre otros.

Referencias

1. J. Martínez. *Estudio de la desertificación por sobrepastoreo mediante un modelo de simulación dinámica*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España 2002. pp.166
2. D. Pimentel, C. Harvey, P. Resosudarmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Shpritz, L. Fitton, R. Saffouri, R. Blair. "Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits". *Science*. Vol. 267. 1995. pp. 1117-1123.
3. J. Antezana. *Calibración de los factores de erosión utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisado "RUSLE" en sistemas de producción agrícola de la cuenca Taquiña*. Tesis maestría. Universidad de San Simón. La Paz, Bolivia. 2001. pp. 77.
4. M. Alviar. *Economic and environmental effects of land use on water yield and sediment: a case study in Colombia*. Tesis doctoral. Oklahoma State University. Stillwater, US. 2004. pp.152
5. Comisión de las Comunidades Europeas. *Comunicación de la comisión al consejo, el parlamento europeo, el comité económico y social y el comité de las regiones. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo*. 2002. Bruselas, Bélgica. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2002:0179:FIN:ES:PDF>. Consultado en julio de 2011.
6. M. Giménez. *Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos RUSLE y USPED. Aplicación al arroyo del lugar, Guadalajara (España)*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid, España. 2008. pp. 391
7. B. Yu. "Process-based erosion modelling: promises and progress". In UNESCO, M. Bonell, & L. Bruijnzeel (Eds.). *Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water*. 1st ed. Ed. Cambridge University Press. Paris, France. 2005. pp. 790-810.
8. O. Andrade, M. Kappas, S. Erasmi. "Assessment of erosion hazard in Torres municipality of Lara state (Venezuela) based on GIS". *Internicia*. Vol. 35. 2010. pp. 348-356.
9. A. Barrios. "Distribución espacial del factor LS (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles con IDRISI. Aplicación en una microcuenca andina". *Revista forestal venezolana*. N° 44. 2000. pp. 57-64.
10. G. Brhane, K. Mekonen. "Estimating soil loss using Universal Soil Loss Equation (USLE) for soil conservation planning at Medego watershed, Northern Ethiopia". *Journal of American Science*. Vol. 5. 2009. pp. 103-107.
11. L. Claessens, P. Van Breugel, A. Notenbaert, M. Herrero, J. Van. "Mapping potential soil erosion in East Africa using the Universal Soil Loss Equation and secondary data". *Sediment Dynamics in Changing Environments*. Vol. 325. 2008. pp. 398-407.

12. N. Diodato. "Estimating RUSLE's rainfall in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime" *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 8. 2004. pp. 103-107.
13. M. Jain, S. Mishra, R. Shah. "Estimation of sediment yield and areas vulnerable to soil erosion and deposition in a Himalayan watershed using GIS". *Current Science*. Vol. 98. 2010. pp. 213-221.
14. E. Lianes, M. Marchamalo, M. Roldán. "Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birris, Costa Rica". *Agronomía Costarricense*. Vol. 33. 2009. pp. 217-236.
15. D. Pérez, O. Mesa. *Estimación del factor de erosividad de la lluvia en Colombia*. 2002. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4281/1/DA3468.pdf>. Consultado en marzo de 2010.
16. N. Hoyos. "Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes". *CATENA*. Vol. 63. 2005. pp. 85-108.
17. S. Merritt, R. Letcher, J. Jakeman. "A review of erosion and sediment transport models". *Environmental Modelling & Software*. Vol. 18. 2003. pp. 761-799.
18. F. Agostinho. *Uso de análise energética e sistema de informações geográficas no estudo de pequenas propriedades agrícolas*. Tesis de Maestría. Universidade Estadual De Campinas. Campinas, Brasil. 2005. pp. 226
19. J. Ramírez. *Producción de sedimentos en cuencas: Revisión de criterios y aplicabilidad a la cuenca del río Apulco*. Tesis Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Jiutepec, México. 2009. pp. 180.
20. Y. Almonza, G. Alonso, M. Ruiz, H. Medina. "Cambios climáticos y sus efectos en las pérdidas de suelo en la cuenca del río Cuyaguateje". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol. 18. 2009. pp. 32-39.
21. R. Mattos. *Pequeñas obras hidráulicas*. Biblioteca Virtual del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe de la UNESCO. 1999. Disponible en: <http://www.unesco.org/phi/biblioteca/archive/files/eadd0e8c29935c9517f15ef51e46f83f.pdf>. Consultado en abril de 2010.
22. TRAGSA. *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. 2ª ed. Ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 1998. pp. 945
23. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Metodologías para la valoración económica de bienes, servicios ambientales y recursos naturales*. Bogotá, Colombia. 2003. pp. 51.
24. E. Cristeche, J. Penna. "Evaluación del Impacto Económico de los Servicios Ambientales en los Sistemas de Producción y las Externalidades Asociadas: los casos de las Ecorregiones Pampeana y Chaqueña". *Métodos de valoración económica de los servicios ambientales*. N.º. 3. 2008. pp. 56.
25. R. Barzev. *Guía metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales*. Corredor biológico mesoamericano. Managua, Nicaragua. 2002. pp. 149. Disponible en: http://blog.unach.mx/vicente_castro/files/2011/10/Gu%C3%ADa_Metodol%C3%B3gica.pdf. Consultado en agosto de 2010.
26. R. Smith, O. Mesa, I. Dyner, P. Jaramillo, G. Poveda, D. Valencia. *Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre*. 2ª ed. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2000. pp. 354.
27. CORNARE. *Uso potencial del suelo en los municipios del altiplano del oriente antioqueño (Rionegro, Marinilla, San Vicente, El Carmen de Viborral, Guarne, El Retiro, La Ceja, El Santuario y La Unión)*. Bogotá, Colombia. 1995. pp. 390.
28. Instituto de Estudios Regionales - INER. *Oriente. Desarrollo regional: una tarea común universidad-región*. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2003. pp.94
29. PLANEО. *Plan Estratégico Para un Pacto Social Por el Desarrollo del Oriente Antioqueño*. 2009. Disponible en: <http://planestrategicodelorienteblogspot.com/>. Consultado en julio 2010.
30. M. Vélez y R. Smith. *Hidrología de Antioquia*. 1ª ed. Ed. Imprenta departamental- Secretaría Obras Públicas. Medellín, Colombia. 1997. pp. 220.
31. Gobernación de Antioquia. *Anuario estadístico del sector agropecuario*. 2008. Disponible en: <http://www.antioquia.gov.co/antioquia-v1/organismos/agricultura/Anuario%20en%20CD%202009/index.htm>. Consultado en agosto de 2010.

32. S. Pérez. *Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica*. 2001. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/modeloerosion.pdf>. Consultado en julio de 2010.
33. F. Oñate. “Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos”. *Revista electrónica de la REDLACH*. N° 1. 2004. pp. 27-32.
34. L. Orejuela, B. Zapata. “Evaluación de la eficiencia productiva y reproductiva en hatos lecheros del cercano Oriente Antioqueño”. *Revista Universidad Católica de Oriente*. Vol. 19. 2005. pp. 67-78.
35. C. Restrepo, M. Alviár. “Tasa de descuento y rotación forestal: el caso del Eucalyptus Saligna”. *Lecturas de Economía*. Vol. 73. 2010. pp. 149-164.