

## Procesos de Geoprocesamiento en la Espacialización de Servicios Ecosistémicos en Áreas de Interés Local, Caso de Estudio: Cuenca la Presidenta

**Juan C. Valdés Q.**  
Politécnico Colombiano  
Jaime Isaza Cadavid  
Facultad de Ingeniería  
jcvaldes@elpoli.edu.co

**Carlos A. Castro C.**  
Universidad de San  
Buenaventura, Medellín  
Facultad de Ingeniería  
carlos.castro@usbmed.edu.co

**Helena Pérez G.**  
Universidad de San  
Buenaventura, Medellín  
Facultad de Ingeniería  
helena.perez@usbmed.edu.co

**John F. Escobar M.**  
Politécnico Colombiano  
Jaime Isaza Cadavid  
Facultad de Ingeniería  
jfescobar@elpoli.edu.co

(Tipo de Artículo: Investigación Científica y Tecnológica. Recibido el 22/09/2016. Aprobado el 15/02/2017)

**Resumen.** Es evidente la ausencia de modelos de datos que permitan la caracterización y mapeación de funciones ecosistémicas (FE) y servicios ecosistémicos (SE) que puedan ser implementados en los mercados comerciales y poco peso en la toma de decisiones para el soporte de la generación de políticas de conservación y gestión del recurso natural. En el presente estudio, se realiza una revisión de la literatura en donde se abordan los conceptos fundamentales de la estructura ecológica principal (EEP), las FE y los SE, su impacto en los procesos de gestión del territorio y los principales modelos y herramientas que se utilizan en el orden global para su modelación. Basados en el protocolo ECOSER, se realiza una simulación del SE de estabilidad de laderas en la localidad de la cuenca La Presidenta, obteniendo como resultado una relación entre la cobertura vegetal en la zona rural de la cuenca y en algunos sectores urbanos en donde los procesos de control de erosión, erodabilidad, los índices de erosividad y la implementación de obras hidráulicas, permiten obtener beneficios tangibles. Este modelo posibilita recrear escenarios de comportamiento del flujo de dicho SE, permitiendo contar con herramientas que a futuro sean utilizadas en la gestión pública y la planificación territorial.

**Palabras clave.** Ecosistemas, Servicios Ambientales, Ordenamiento Territorial, Laderas de alta Montaña

### ***Geoprocessing Management for the Spatialisation of Ecosystem Services in Areas of Local Interest, Case of Study: Cuenca La Presidenta***

**Abstract** *It is evident the absence of data models that allow the characterization and mapping of ecosystem functions and ecosystem services that can be implemented in commercial markets, and in decision making to support the generation of conservation policies and management of the natural resource. In the present study, a review is made in which the fundamental concepts of the main ecological structure are addressed, the ecosystem functions and ecosystem services, their impact on processes of territorial management and the main models and tools is done that used in the global order for modeling. Based on the ECOSER protocol simulation SE slope stability is carried out in the locality of the basin La Presidenta, resulting in a relationship between vegetation cover in rural area of the basin and in some urban areas where erosion control process, erodibility, erosivity index and implementation of hydraulic structures, get tangible beneficial. This model also allows scenarios flow behavior of the ecosystem services, allowing to have tools that are used in future governance and territorial planning.*

**Key Words:** *Ecosystems, Environmental Services, Territorial Management, High Mountain Slopes*

## 1. Introducción

Los procesos de gestión y ordenamiento del territorio desde las políticas públicas deben soportarse en elementos que involucren la dimensión ambiental de manera amplia y profunda, para ello se establece la necesidad de definir la estructura ecológica principal (EEP) y la caracterización y mapeación de los servicios ecosistémicos (SE), para su incorporación en planes e instrumentos de planificación sectorial y territorial y que permitan satisfacer las necesidades básicas de la población [1].

En [2], donde se reglamentan los aspectos determinantes del ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación, se define la EEP como *“El conjunto de elementos bióticos y abióticos que dan sustento a los procesos ecológicos esenciales del territorio, cuya finalidad principal es la preservación, conservación, restauración, uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables, los cuales brindan la capacidad de soporte para el desarrollo socioeconómico de las poblaciones”*(p. 6). El IDEAM, [1], igualmente plantea como una meta de orden superior la EEP debe “asegura en el tiempo la protección de la diversidad biológica en sus diferentes niveles de organización y de los servicios que proveen los ecosistemas naturales, orientando el manejo adecuado de las mismas”, basados en dos principios claves: En primera instancia, que la EEP contiene las áreas que aseguran la continuidad de los procesos ecológicos y evolutivos naturales para mantener la diversidad biológica de la nación y en segundo lugar, que debe contener las áreas de mayor significancia en la oferta de servicios ecosistémicos que benefician a la población y soportan el desarrollo económico.

En [3], y específicamente en el aparte de gestión ambiental y del riesgo de desastres se menciona *“la biodiversidad como elemento potencial para definir una nueva identidad de país”*, y se expresa una limitación en el cumplimiento o la generación de leyes al respecto, dado que no se cuentan con elementos claves en la delimitación de áreas de importancia ecológica, la zonificación y ordenación de las reservas forestales nacionales y la definición de la EEP, lo cual es fundamental para orientar la formulación e implementación de políticas nacionales y negociaciones intersectoriales, que privilegien la sustentabilidad de la vida.

En las últimas décadas, se han venido desarrollando estudios e investigaciones alrededor de la vinculación de las funciones de los ecosistemas con sus servicios, posibilitando acercamientos para la integración del concepto del servicio del ecosistema en la planificación del territorio, la gestión de los recursos y la toma de decisiones.

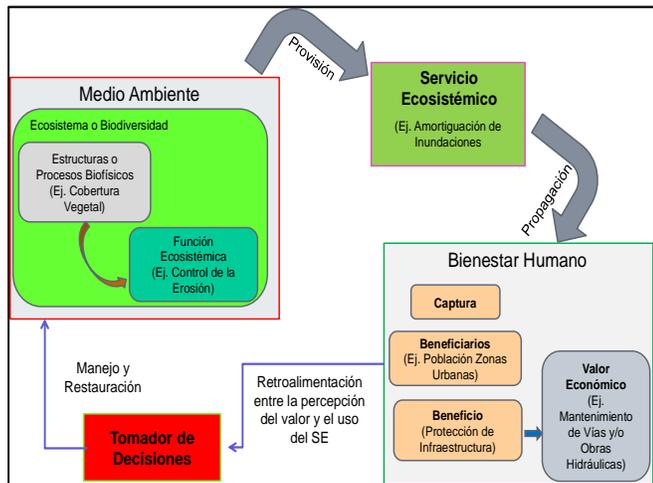
El término de servicio ecosistémico “SE” es utilizado en la literatura científica desde hace varias décadas y orientado hacia la valoración del capital natural [4]; [5],

y es entendido como los beneficios que los ecosistemas proveen a los seres humanos. Éste enfoque de SE ha ganado claridad conceptual a partir del modelo de cascada propuesto por [6], [7], en donde se plantea una secuencia de valor conceptual y metodológico que vincula el capital natural (biodiversidad, ecosistemas) con el bienestar humano. En este se describe el flujo de procesos socio-ecológicos entre los que se distinguen: a) los beneficios, como aquellos productos finales de los ecosistemas que en interacción con la actividad socioeconómica y/o cultural aportan al bienestar, b) los SE propiamente dichos, como aquellos procesos ecosistémicos que soportan directa o inmediatamente la generación de beneficios, y c) las funciones ecosistémicas (FE), como el conjunto de procesos que soporta la provisión de un determinado SE y que dependen de la calidad del ecosistema (tipo, extensión, estado de conservación).

Los SE pueden ser definidos como las condiciones y procesos mediante los cuales los ecosistemas y las especies que habitan en ellos, mantienen la vida humana [8] y son determinados por su contribución al bienestar humano, al ser el producto final de diversas FE (clima, agua, erosión), que pueden proveer bienes tangibles tales como madera o los alimentos resultado de diferentes procesos del ecosistema [9]. Los valores sociales que la población asigne a determinado paisaje o ecosistema son fundamentales en la planificación ambiental y el ordenamiento territorial, ya que pueden proporcionar elementos sustanciales de decisión a través de la participación activa de las comunidades locales e instituciones interesadas en el proceso de planificación [10], [11], [12], [13].

El avance en el estudio sobre FE y SE ha permitido establecer acuerdos y estrategias estandarizadas alrededor de la evaluación de los ecosistemas [14], constituyendo escenarios en los que los SE son los beneficios que las poblaciones humanas obtienen, directa o indirectamente de las FE [15], destacando como resultados que la pérdida de la biodiversidad y el deterioro de los SE contribuyen (directa o indirectamente) a deteriorar aspectos del bienestar humano como la salud y la seguridad alimentaria, incrementado la vulnerabilidad y riesgo; es por tal motivo que los tomadores de decisión deben involucrar a los SE en los ejercicios de priorización, aunque se reconocen las dificultades conceptuales, técnicas y operativas al momento de otorgarle un carácter espacial a los servicios ecosistémicos [13].

En la Figura 1 se puede observar un modelo conceptual en donde se identifica la provisión de SE a partir de FE, su propagación hacia los beneficiarios y la retroalimentación que se puede realizar desde los tomadores de decisión para conservar los ecosistemas.



**Figura 1. Funciones y Servicios Ecosistémicos. Adaptado [16]**

En la Tabla 1 se presenta la clasificación de SE en sus tres niveles principales, según la categorización propuesta por [16].

Es importante resaltar dentro de la modelación tanto de FE, como de SE, los asuntos relacionados con la escala se convierten en un factor determinante al momento de obtener resultados concretos y confiables para la gestión territorial en comunidades específicas [17], plantean la necesidad de ajustar a escalas de análisis apropiadas, áreas pequeñas que ofrecen varios beneficios, que han sido pasados por alto, debido a que quedan fuera del inventario de los SE analizados a escala regional o de orden superior. En un caso específico de pequeños humedales, en que la obtención de SE como es la calidad y regulación de agua y el control de la biodiversidad, no son inventariados dada la utilización de escalas inadecuadas, pues se dejan de lado aspectos relevantes como la extensión del área en la modelación, y no se identifican en el contexto de su ubicación e interrelación con otras fuentes hídricas.

La Iniciativa para la Conservación en la Amazonia Andina – ICAA, con base en los estudios Evaluación de los Ecosistemas del milenio y los informes y marco metodológico propuesto por el enfoque de la Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad [18], plantean aspectos metodológicos para caracterización y valoración de los SE y su integración en la planificación local. Igualmente, en el proyecto financiado por el fondo para el medio ambiente mundial [19], se presenta un enfoque a los SE a escala local, donde definen aspectos metodológicos para la selección de los SE de interés así como la importancia de identificar los beneficiarios y sugiere algunas herramientas geoinformáticas para simular escenarios de actuación con el fin de priorizar áreas de conservación y/o recuperación para asegurar la producción sostenible.

**Tabla 1. Clasificación de Servicios Ecosistémicos Adaptado [16]**

Sección	División	Grupo
Provisión	Nutrición	Biomasa Agua
	Materiales	Biomasa, Fibra Agua
	Energía	Fuentes de energía de biomasa Energía mecánica
Regulación y Mantenimiento	Mediación de residuos, sustancias tóxicas y otras molestias	Mediación vía biota Mediación vía ecosistemas
	Mediación de flujos	Flujos de masa Flujos líquidos Flujos gaseosos/aire
	Mantenimiento de las condiciones físicas, químicas, biológicas	Mantenimiento de ciclo de vida, habitat y protección de material genético Control de plagas y enfermedades Composición y formación del suelo Condiciones del agua Regulación del clima y la composición atmosférica
Cultural	Interacciones físicas e intelectuales con los ecosistemas y paisajes terrestres/marinos [configuración ambiental]	Interacciones físicas y experienciales Interacciones intelectuales y de representación
	Interacciones de tipo espiritual, simbólica y otras con los ecosistemas y paisajes terrestres/marinos [configuración ambiental]	Espiritual o emblemáticos Otros productos culturales

Otro casos de interés, abordados en [20], presentan un marco conceptual, modelos, aspectos legales, de valoración de SE, así como casos de aplicación, y hace énfasis la existencia de conexiones entre los sistemas a escala local con relación a aspectos de economía y política global; dentro de los cuales se resaltan los recursos hídricos subterráneos (descenso de niveles y salinización) y superficiales (disminución de caudales, reducción de humedales).

Estos trabajos concluyen sobre las inconveniencias de realizar extrapolaciones directas de una escala a otra, pues dichas técnicas podrían ser contraproducentes en áreas de mayor tamaño o

viceversa, más aun en asuntos que involucren gradientes productivos y en este caso, se recomiendan abordajes de planificación a escalas específicas, locales, regionales o de paisaje [21].

## 2. Metodologías, Modelos y Herramientas para la Caracterización de FE y SE

El desarrollo evidenciado en el ítem anterior en los últimos años, ha permitido no solo un creciente incremento de la literatura científica sobre la temática de la caracterización y mapificación de FE y SE, sino que a la vez, con diversos enfoques, metodologías y herramientas han concedido diferentes perspectivas al respecto [8].

Se presentan tres grandes enfoques metodológicos alrededor de la caracterización y mapificación de SE: en primer lugar, un enfoque soportado desde la transferencia de beneficios, donde éstos se calculan para un determinado ecosistema y dichos valores se transfieren a zonas amplias en escala regional o global de manera genérica [4]; en segunda instancia se identifica el enfoque por funciones de producción de un SE, en donde éstas se modelan, en un área acotada de orden más local, a través de una función de producción ecológica que relaciona el flujo del SE con las variables ecológicas locales [22]; y en tercer lugar se identifica el enfoque de evaluación socio ecológica, el cual enfatiza en los valores y las prioridades sociales por encima de los indicadores económicos, lo anterior, utilizando entrevistas técnicas con los tomadores de decisión en lo referente al manejo de los recursos naturales y con la comunidad misma, propiciando una cuantificación y mapificación de SE con actores de primera línea [23].

Lo anterior, aunque proporciona elementos diversos, los resultados vislumbran una inconsistencia y falta de adecuación de los enfoques e instrumentos que soportan la toma de decisión, [24], [26], generando en muchas herramientas utilizadas para la mapificación pero con poca claridad de los componentes del modelo conceptual representados en Figura 1, los cuales están siendo evaluados, y en otros tantos casos más, se utilizan de manera indistinta y se combinan entre sí en mapas complementados. En [27] se argumenta que en muchas ocasiones, en donde se contemplaban procesos para la mapificación de SE, en realidad, éstos estaban orientados a la mapificación de FE, lo cual refleja, el alto nivel de confusión que se tiene aún entre los conceptos de función, servicio y beneficio.

Sin embargo, el avance tecnológico y la utilización de herramientas de análisis espacial, soportado sobre plataformas geomáticas ha permitido el incremento exponencial de diversos métodos de mapificación para SE [26].

A continuación, se describen algunas de éstas herramientas, destacando sus principales características:

**InVEST** (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs): Este proyecto iniciado en el 2006 por el

Natural Capital Project (universidades de Stanford y de Minnesota, The Nature Conservancy, WWF), es un conjunto de herramientas que se ejecutan de manera independiente, las cuales son desarrolladas para trabajar sobre la suite de ArcGIS, y permiten la mapificación y valoración de diversos SE, proporcionando como insumo fundamental la espacialización de flujos, beneficios y análisis de compromisos bajo múltiples escenarios simulados, posibilitando así su objetivo principal: informar y mejorar la gestión de los recursos naturales y las decisiones de inversión.

El conjunto de 17 herramientas, proporciona la misma cantidad de modelos para analizar ambientes marinos y terrestres, y están soportados en funciones de producción de servicios, dependiendo de la estructura y los procesos de los ecosistemas. Dentro de los modelos presentados se encuentran los SE de: Almacenamiento de Carbono, Retención de Sedimentos, Purificación de Aguas, Hidroenergía, entre otros.

Aunque es una de las herramientas más utilizadas en el momento para la mapificación de SE, algunos autores [28], plantean desventajas como la simpleza de algunos de los modelos a nivel de variables involucradas, la dificultad para obtener datos espaciales utilizados en los modelos en escenarios locales, modelos muy generales sin tener en cuenta aspectos de geomorfología propias de regiones específicas y la ausencia de algunas variables claves a nivel de aguas superficiales y subterráneas.

**SoIVES** (Social Values of Ecosystem Services): Es una herramienta desarrollada por el USGS Rocky Mountain Geographic Science Center & Colorado State University, constituida para la valoración social de SE, la cual permite efectuar una estimación complementaria a la evaluación económica y resalta la información primaria obtenida a partir de grupos de interés [29]. Al igual que InVEST, permite alojarse y desarrollar modelaciones con ArcGIS. La aplicación permite evaluar, mapificar y cuantificar el valor social percibido de los SE, a través de un índice de valor no monetario y se alimenta fundamentalmente de datos recolectados mediante encuestas a diferentes actores sociales.

Los productos obtenidos con esta herramienta son mapas e información estadística sobre diferentes valores sociales. Esta combinación de información espacial y tabular proporciona la visión de los diferentes actores sociales en relación con los aspectos físicos y ambientales [28].

**ARIES** (Artificial Intelligence for Ecosystem Services): Herramienta basada en tecnologías Web, desarrollada en la Universidad de Vermont, EEUU, tiene como objetivo fundamental ofrecer un soporte inteligente para la evaluación y valoración de SE, facilitando y mejorando la toma de decisiones ambientales. La aplicación usa una metodología para cuantificar los SE, la cual reconoce la complejidad

inherente a estos procesos pero proporciona modelos suficientemente sencillos para que sean abordables, es escala amplia de orden general y aplicables a diferentes niveles de detalle según la disponibilidad de datos [30].

Dado que es una herramienta bastante reciente, solo aborda algunos modelos de SE y es necesario una conexión a internet, tanto para su utilización, como para el proporcionamiento de datos en servidores.

**ECOSER** (Protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial), desarrollado en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina, el CONICET y otras instituciones [31].

Esta herramienta es desarrollada como soporte para la toma de decisiones sobre uso de la tierra en el marco de procesos de ordenamiento territorial rural. Está fundamentada en un protocolo o conjunto de procedimientos que permiten evaluar y mapear SE y estimar la vulnerabilidad socio-ecológica frente a la pérdida de los mismos, teniendo en cuenta la cuantificación y representación espacial del flujo de los servicios [32].

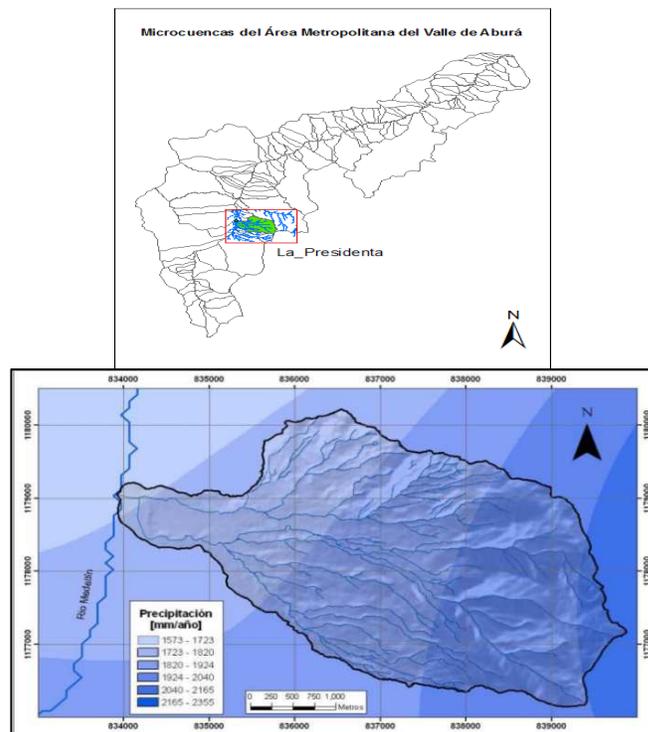
El protocolo comprende dos etapas o módulos: la evaluación del flujo de SE en una unidad de paisaje y el cálculo de sus beneficios asociados y en segunda instancia la evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica frente a la pérdida del flujo de SE y beneficios. La plataforma utiliza para sus modelos el módulo Model Builder de la Suite ArcGIS.

Como puede observarse, existen múltiples herramientas, aplicaciones y métodos para la caracterización y mapeación de SE, algunos de ellos de forma muy general y a escalas globales, y otros con posibilidad de abordar, mediante los modelos, variables e indicadores a escala local, sin embargo su manejo suele ser complejo, tanto desde las lecturas específicas del territorio, así como la adquisición de los datos mínimos necesarios para poder simular los SE.

### 3. Caso cuenca la Presidenta

#### 3.1 Contexto del área de trabajo, métodos y herramientas

El área de estudio seleccionada para el desarrollo de este trabajo es la Microcuenca La Presidenta, ubicada en el suroriente de la Cuenca del Valle del Aburra ver Figura 2. Esta cuenca presenta un ensamble de diferentes ambientes urbanos y rurales en un área aproximada de mil quinientas hectáreas.



**Figura 2. Ubicación de la Microcuenca la Presidenta, dentro de la estructura de la Cuenca del Valle del Aburra y Distribución espacial de la precipitación promedio anual en la Microcuenca de La Presidenta [33]**

Una de las razones por la cual se escogió esta cuenca como área de estudio es debido a que en ella se adelantan proyectos para la instrumentación que permita establecer una red de monitoreo de variables hidrológicas y geotécnicas, en donde se podrían obtener a futuro datos e información que posibilite alimentar los modelos en aras de definir zonas de retiro en los cauces y evolución de la oferta y demanda hídrica de la cuenca, esto según, uno de los faltantes fundamentales expuesto en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá [33]. Además, se cuentan con algunas intervenciones urbanísticas que desde lo proyectual se conciben como una forma de protección y conservación de algunas funciones ecosistémicas.

**Climatología:** El área se caracteriza por tener un clima subtropical monzónico templado y húmedo, con una temperatura promedio de 22°C. La distribución espacial de la Figura 2 muestra una precipitación media anual en la región de estudio. En ésta puede observarse que las mayores precipitaciones se presentan en la parte alta de la microcuenca y las menores en la zona más plana variando entre 1573 y 2355 [mm/año], con una precipitación promedio de 1886 [mm/año] [33].

El área de estudio presenta una distribución espacial de la evapotranspiración, calculada con la ecuación Turc, la cual se encuentra entre el rango de los 668 a los 1032[mm/año] [33].

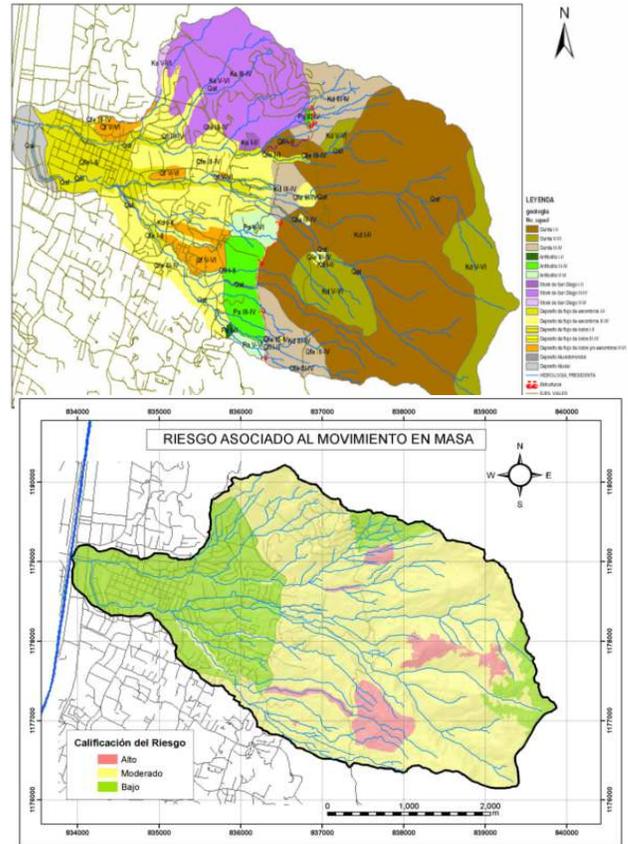
**Hidrología:** En cuanto a los aspectos de escorrentías superficiales y soportados con un balance hidrológico a

largo plazo, a partir de los mapas de precipitación y evaporación media multianual se posee el caudal medio de la microcuenca de la quebrada La Presidenta, la cual tiene un área superficial aproximada de 15 km<sup>2</sup>, una longitud del cauce principal de 7.17 km, pendiente promedio de 17.68 % y una pendiente del cauce de 18.33%. Nace en la vereda el Plan del corregimiento de Santa Elena, aproximadamente en la cota 2700 y desemboca en el río Medellín en la cota 1488 m. Los caudales medios anuales se establecieron entre las franjas de 0 a 0.978m<sup>3</sup>/s [33]

A partir del modelamiento hidráulico de la red de drenaje de la cuenca la Presidenta, realizado por el plan de manejo ambiental para la misma [34], se determinó que la zona baja de la cuenca, con modelación de períodos de retorno de 100 y 500 años, presenta la generación de manchas de inundación a partir de problemas de suficiencia hidráulica de los canales, los cuales son causados por la presencia de un número importante de obras de cruce de vía (en su mayoría boxculverts) que causan fuertes controles hacia aguas arriba, ocasionando desborde hacia la zona inundable próxima a los mismos, sumado esto a las diferentes canalizaciones, rectificaciones de los cauces e invasión de las zonas próximas a las corrientes y los procesos urbanísticos que han restringido las corrientes que ocasionan la pérdida de zonas naturales de amortiguamiento de creciente en diferentes puntos de la red.

Desde el punto de vista geológico, el Valle de Aburrá presenta un afloramiento de diferentes unidades litológicas: rocas metamórficas del Paleozoico y Cretácico, rocas ígneas del Cretácico y depósitos no consolidados de edades todavía no determinadas [34] Ver Figura 3.

Para la zona se han realizado [33] modelaciones para estimar la evaluación del riesgo, la cual debe surgir a partir de la superposición de las vulnerabilidades ante cada amenaza y la peligrosidad específica y como resultado se tienen mapas de riesgo para cada amenaza, como en la Figura 3, en donde se evidencia el riesgo asociado a movimientos de masa, el cual en la zona posee criterio altos y moderados en una franja de alta montaña, lo cual impacta fuertemente en valores esperados de la pérdida de vidas y bienes materiales.



**Figura 3. Mapa de Unidades Superficiales y riesgo asociado a movimientos en masa de la Microcuenca de la quebrada La Presidenta [34]**

### 3.2 Problemáticas Físicas y Sociales en el Área de Estudio.

Dentro de las problemáticas asociadas al área de estudio en lo concerniente a aspectos físicos y sociales se destacan las siguientes [33]:

**Desarticulación de las obras hidráulicas:** Las obras hidráulicas realizadas en la gran mayoría de las corrientes responden a la solución de problemas puntuales y sus implicaciones no son tenidas en cuenta en obras ya existentes o en canales naturales adyacentes. La presencia de obras sin una articulación clara a nivel hidráulico con la corriente es cada vez más común en nuestro medio, tanto en la zona rural como en la urbana.

**Aumento de Escorrentía:** El aumento de las áreas urbanizadas y pavimentadas hace que se genere una mayor escorrentía directa con poca infiltración que implica un aumento en los caudales máximos que transitan por los canales y cauces de las corrientes de agua.

**Insuficiencia en la capacidad Hidráulica:** La gran mayoría de las coberturas (box-culverts) fueron diseñadas con caudales hallados con unas condiciones de cobertura vegetal y usos del suelo diferentes a los actuales. Debido al crecimiento de la zona urbana, la escorrentía ha aumentado y las estructuras hidráulicas

se han vuelto insuficientes. Además, las autoridades ambientales que son las competentes de otorgar los permisos de intervención no tienen criterios claros para dimensionar las obras en función de la capacidad hidráulica.

**Problemas del agua subterránea:** Se considera como problema general el poco conocimiento del recurso agua subterránea enmarcado en los aspectos estructurantes (fuente, recarga, uso y calidad) desde el punto de vista del uso sostenible del recurso, ya que para lograr esto es necesario conocer la disponibilidad, la calidad y el uso actual del mismo.

Se percibe otro problema de contaminación por la actividad antrópica apuntando a estaciones de servicio, desechos de procesos industriales y lixiviados, y un tercer problema que está relacionado con la impermeabilización de la superficie de gran parte de la zona con alto potencial para la recarga directa ya que ésta coincide en gran medida con los suelos urbanos de los municipios del Valle de Aburra, lo que limita la recarga directa a las zonas verdes de la zona urbanizada.

**Problemas de Cobertura:** Para el sector alto del oriente de la cuenca presentan mucho deterioro y poco desarrollo en su estructura, y corresponden a lo que quedó de un pasado de explotación minera y agropecuaria. Los niveles de deterioro de los bosques de Guarne son en general altos, existiendo muy pocos bosques de categoría Secundario tardío, y menos aún de la categoría Primario. Estas coberturas de bosques en Guarne no son una garantía especial para una regulación hídrica confiable.

Alto grado de fragmentación de los ecosistemas naturales. Alteración de las unidades ecosistémicas de la cuenca: la destrucción de integridad y continuidades ecosistémicas ha generado un paisaje balcanizado con parches de cobertura boscosa nativa de poca área (<5 km<sup>2</sup>, con alto efecto de borde) que no favorecen la continuidad de las demandas ambientales de las dinámicas ecológicas de muchas poblaciones silvestres nativas de la cuenca. Como elemento causal está el modelo de crecimiento económico adoptado por la cultura local, que ha permitido el desarrollo de infraestructura de movilidad, la ubicación de equipamientos y desarrollos urbanísticos, que han ignorado o desconocido las demandas ecológicas de las poblaciones silvestres nativas y su contexto ecorregional.

**Problemas de orden social:** Las tendencias observadas en la dinámica poblacional de la cuenca dan cuenta de la presión que los pobladores ejercen sobre los recursos naturales, en términos de una alta movilidad por fenómenos migratorios; y del estado de los recursos, que muestra en la cuenca alta dependencia en consumo de bienes y servicios y baja innovación tecnológica.

En el caso del municipio de Medellín, el desplazamiento forzado y la constante inmigración han

conllevado un número significativo de asentamientos en zonas de alto riesgo y en zonas de amortiguamiento de áreas de reserva como en el caso del Parque Arví [33].

### 3.3 Propuesta de Modelo para la Mapificación de SE en la Microcuenca La Presidenta

Establecido el contexto y las problemáticas físicas y ambientales en el área de estudio, el presente trabajo plantea realizar la mapificación de varios SE siguiendo los modelos y protocolos establecidos en ECOSER, realizando los respectivos ajustes al área de trabajo. Dentro de los servicios a trabajar se encuentra el de estabilidad de laderas, dada la pertinencia en relación a contextos físicos de amenaza y riesgo en la zona de estudio, el cual debe ser determinado en función del estado de la FE control de la erosión.

Para definir el estado de la FE, el control de la erosión se expresa en (ton/año) de pérdida media anual de sedimentos por erosión hídrica [32]. La erosión y la sedimentación son procesos naturales pero en condiciones externas pueden ocasionar impactos negativos como la reducción de la productividad agrícola, la contaminación de cuerpos de agua superficiales, entre otros. La magnitud del transporte de sedimentos en una cuenca se determina por varios factores. La variación natural en las propiedades del suelo, los patrones de precipitación y la pendiente crean patrones de erosión y de flujo de sedimentos. Mientras que otros factores como la cobertura vegetal mantienen el suelo en su lugar y capturan los sedimentos durante su transporte [35].

Teóricamente la estabilidad de laderas se pierde después del 35% de pendiente por razones de la fuerza de gravedad

Para estimar el control de la erosión se puede utilizar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada [36], Ver Ecuación 1

$$A_i = R_i * K_i * LS_i * C_i * P_i \quad (1)$$

Donde

$A_i$  Es la pérdida media anual de sedimentos por erosión hídrica (Ton/año)

$R_i$  es el factor erosivo de las lluvias o índice de erosividad.

$K_i$  es la susceptibilidad del suelo a la erosión

$LS_i$  es un factor que combina la longitud del flujo y el grado de la pendiente

$C_i$  es la cobertura y  $P_i$  corresponde a prácticas de conservación que representan las reducciones de pérdidas de sedimentos por protección de la cobertura y buenas prácticas de manejo

En [32], se plantea la posibilidad de estimar la capacidad de la vegetación de un determinado píxel (i) para mantener el suelo en su lugar (control de la erosión) mediante la comparación de la tasa de erosión en ese píxel versus la tasa de erosión que tendría ese

píxel sin vegetación presente (suelo descubierto). La estimación RUSLE [36] para suelo desnudo se calculó como:

$$A_{\max\_i} = R_i * K_i * LS_i \quad (2)$$

En tal sentido, el control de la erosión de un píxel *i* es igual a la diferencia entre:

$$A_{\max\_i} - A_i \quad (3)$$

En concordancia con lo anterior, se plantea el siguiente modelo para la mapificación de la FE Control de la Erosión:

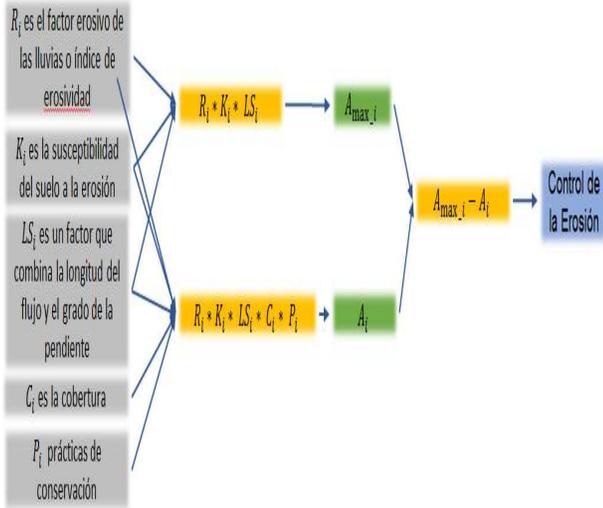


Figura 4. Modelo para Mapificar la Función Control de la Erosión

#### 4. Resultados y conclusiones

Los resultados obtenidos después de la modelación, utilizando las funcionalidades model builder de ArcGIS y utilizando el modelo expuesto en la Figura 4, permiten una visualización de la mapificación de SE de estabilidad de laderas en la microcuenca La Presidenta.

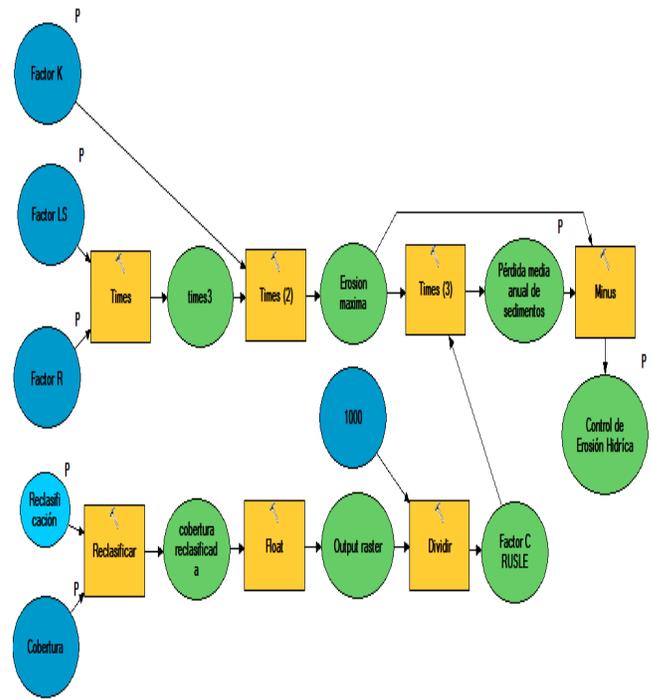
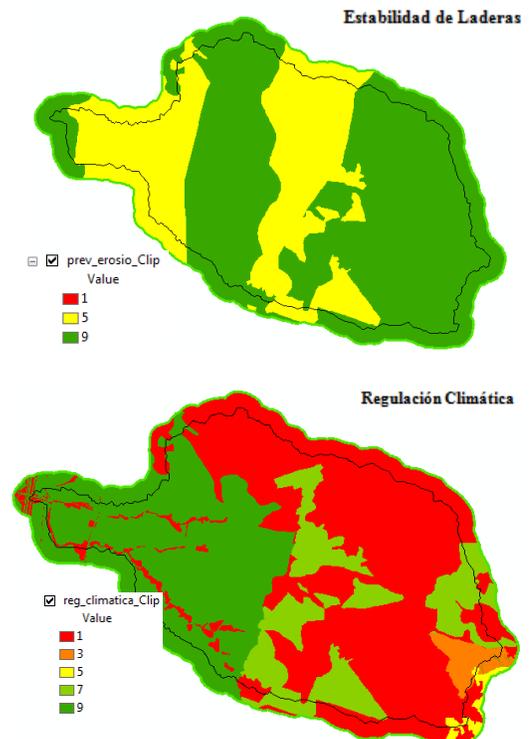
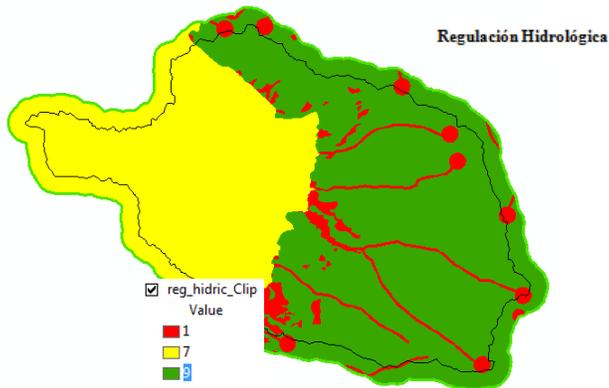


Figura 5. Modelo para la Mapificación de Servicios Ecosistémicos





**Figura 6. Resultados de la Mapificación de Servicios Ecosistémicos en la Microcuenca la Presidenta**

Según las derivaciones obtenidas, visualizadas en la Figura 5, la provisión del servicio ecosistémico en el área de estudio evidencia una relación coherente entre la cobertura vegetal en la zona rural de la microcuenca y en algunos sectores urbanos en donde los procesos de control de erosión, erodabilidad, los índices de erosividad y la implementación de obras hidráulicas, permiten obtener beneficios tangibles para la población.

De igual manera se realizaron modelaciones orientadas hacia los servicios de regulación climática y regulación hidrológica, obteniendo resultados coherentes a las variables involucradas en cada uno de ellos.

Uno de los grandes inconvenientes al momento de poder ejecutar los modelos es la ausencia de datos en el área de estudio relacionados con el tema de servicios, los cuales deberán ser obtenidos con información secundaria a partir de coberturas vegetales, pues la ausencia de instrumentación en la zona, no proporciona la adquisición de datos primarios.

Trabajos como el que se está presentando poseen gran impacto en la gestión del territorio en localidades, pues a partir de los datos obtenidos, se podrán implementar metodologías para la valoración de servicios y en tal sentido, determinar áreas de protección y conservación más coherentes y su inclusión en la EEP realmente garantizará la oferta natural del territorio, razón por la cual, su proyección hacia todas las microcuencas que componen el Valle de Aburrá se hace fundamental para los planes de ordenamiento territorial del área metropolitana.

## 5. Agradecimientos

Los autores reconocen las contribuciones de Barral, P. y Massone H y Serna C. A [37], en la contribución de aclaraciones conceptuales alrededor de la temática del trabajo. De otro modo agradecen a Meneses G. por la versión original inglesa de este documento.

## 6. Referencias

[1] IDEAM, "Estructura Ecológica Principal de Colombia. Proceso metodológico y aplicación escala 1:500.000," p. 44, 2011.  
 [2] Ministerio de Ambiente, "Decreto 3600 De 2007," vol. 2007, no. 46. pp. 1–16, 2007.

[3] DNP Colombia, "Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 Colombia," Dep. Nac. Planeación. Imprenta Nac. Colomb., vol. Tomo 1, p. 541, 2011.  
 [4] R. Costanza et al., "The value of the world's ecosystem services and natural capital," vol. 387, no. May, pp. 253–260, 1997.  
 [5] R. S. De Groot, M. A. Wilson, and R. M. J. Boumans, "A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services," vol. 41, pp. 393–408, 2002.  
 [6] M. B. Potschin and R. H. Haines-Young, "Ecosystem services: Exploring a geographical perspective," *Prog. Phys. Geogr.*, vol. 35, no. 5, pp. 575–594, Oct. 2011.  
 [7] R. S. de Groot, R. Alkemade, L. Braat, L. Hein, and L. Willemen, "Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making," *Ecol. Complex.*, vol. 7, no. 3, pp. 260–272, Sep. 2010.  
 [8] G. C. Daily and P. A. Matson, "Ecosystem services: From theory to implementation," vol. 105, no. 28, pp. 9455–9456, 2008.  
 [9] F. Villa, M. A. Wilson, R. De Groot, S. Farber, R. Costanza, and R. M. J. Boumans, "Designing an integrated knowledge base to support ecosystem services valuation," vol. 41, pp. 445–456, 2002.  
 [10] H. A. Mooney et al., *Ecosystems And Human Well-Beings: Wetlands and Water*.  
 [11] TEEB, "Teeb - The Economics of Ecosystem and Biodiversity for local and regional policy makers," Report, p. 207, 2010.  
 [12] P. Kumar, "The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic." 2010.  
 [13] De Groot Rudolf; Fisher Brendan; Christie Mike, "Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation," *Econ. Ecosyst. Biodivers. Ecol. Econ. Found.*, no. March, pp. 1–422, 2010.  
 [14] B. Fisher and R. Kerry Turner, "Ecosystem services: Classification for valuation," *Biol. Conserv.*, vol. 141, no. 5, pp. 1167–1169, 2008.  
 [15] UNEP-WCMC, "DEVELOPING ECOSYSTEM SERVICE INDICATORS: Experiences and lessons learned from sub-global assessments and other initiatives," Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montréal, Canada., vol. Technical. p. 118 pages., 2011.  
 [16] R. and M. P. Haines-Young, "Common international classification of ecosystem services (CICES): consultation on version 4, August-December 2012." 2013.  
 [17] M. S. A. Blackwell and E. S. Pilgrim, "Ecosystem services delivered by small-scale wetlands," *Hydrol. Sci. J. – J. des Sci. Hydrol. Hydrol. Sci. J.*, vol. 56, no. 568, pp. 1467–1484, 2011.  
 [18] ICAA, "Aspectos metodológicos para los estudios de caracterización y valoración de los servicios ecosistémicos y su integración en la planificación local." pp. 1–4, 2013.  
 [19] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, "Introducción al enfoque de los servicios ecosistémicos a escala local," *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, vol. 1, 2015.  
 [20] M. Abdo et al., "Servicios Ecosistémicos En Argentina," p. 744, 2010.  
 [21] S. A. Huq, N., "How is the role of ecosystem services considered in local level flood management policies: Case study in Cumbria, England," *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, vol. 17, no. 4, p. 29, 2015.  
 [22] T. H. Ricketts, G. C. Daily, P. R. Ehrlich, and C. D. Michener, "Economic value of tropical forest to coffee production.," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 101, no. 34, pp. 12579–82, 2004.  
 [23] I. Palomo, B. Martín-López, M. Potschin, R. Haines-Young, and C. Montes, "National Parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows," *Ecosyst. Serv.*, vol. 4, no. 2005, pp. 104–116, Jun. 2013.  
 [24] N. D. Crossman et al., "A blueprint for mapping and modelling ecosystem services," *Ecosyst. Serv.*, vol. 4, pp. 4–14, Jun. 2013.  
 [25] M. Martínez-Harms and P. Balvanera, "Methods for mapping ecosystem service supply: a review," *Int. J. Biodivers. Sci. Ecosyst. Serv. Manag.*, vol. 8, no. October, pp. 17–25, 2012.  
 [26] R. Seppelt, C. F. Dormann, F. V. Eppink, S. Lautenbach, and S. Schmidt, "A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead," *J. Appl. Ecol.*, vol. 48, no. 3, pp. 630–636, Jun. 2011.  
 [27] I. Palomo, B. Martín-López, and C. Montes, "Mapping ecosystem services: current trends.," *ACES 2008 A Conf. Ecosyst. Serv.*, p. 28049, 2008.  
 [28] D. Codato and B. Locatelli, "Evaluación Y Mapeo De Servicios Ecosistémicos. Herramientas y Aplicaciones," *Vidasilvestre.Org.Uy*, p. 20, 2012.

- [29] B. C. Sherrouse, J. M. Clement, and D. J. Semmens, "A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services," *Appl. Geogr.*, vol. 31, no. 2, pp. 748–760, 2011.
- [30] F. Villa et al., "A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment," *PLoS ONE*, vol. 9, no. 3, 2014.
- [31] M. L. T. Cossio et al., "ECOSER - Protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial," no. 2, p. 58, 2015.
- [32] M. P. Barral, "PROVISIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN PAISAJES RURALES: DESARROLLO DE CRITERIOS Y HERRAMIENTAS PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL RURAL," Tesis Doctoral. p. 149, 2014.
- [33] M. Area, CORNARE, CORANTIOQUIA, and UNAL, "Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá.," no. 652, p. 104, 2006.
- [34] M. del V. de A. Área, CTA, and S. M. Ambiente, "FORMULACIÓN DEL PLAN DE MANEJO DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA LA PRESIDENTA. Caracterización Física," no. 4800000905, p. 75, 2005.
- [35] H. Tallis et al., *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs ( InVEST ): A Tool for Hydropower Management Natural Capital Project Align Economic Forces with Conservation Systematically - Assess multiple ecosystem services today , and in the future.* 2008.
- [36] K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, and J. P. Porter, "RUSLE: Revised universal soil loss equation," *Journal of soil and Water Conservation*, vol. 46, pp. 30–33, 1991.
- [37] C. A. Serna, J. A. García, and O. Flórez, "Análisis de Rutas de Transporte de Pasajeros Mediante la Herramienta Network Analyst de Arcgis. Caso Aplicado en la Ciudad de Medellín" *Revista de Ingenierías USBMED*, vol. 7, pp. 89–95, 2016.