

Conflictos asociados al uso del suelo: una aproximación al área de conservación óptima en el Páramo de Santurbán

Laura Calderón Etter*

Abstract

Most of the ecosystem services provided by Andean Páramos lack a market price and as a consequence the land use allocation in these ecosystems is inefficient. In this article, I study the case of the Páramo de Santurbán using a dynamic optimization framework to analyze optimal land use decisions, considering three land uses: conservation, agriculture, and mining. I find that when the value of environmental services is taken into account the optimal solution is to allocate at least 74% of the area to conservation. If potential negative externalities from mining are considered, the area dedicated to conservation and agriculture increases and the area devoted to mining decreases by more than 75%.

Resumen

La mayoría de los servicios ecosistémicos que prestan los páramos no cuentan con un precio de mercado y como consecuencia la asignación del uso del suelo en estos ecosistemas resulta ineficiente. En este artículo, se estudia el caso del Páramo de Santurbán usando un enfoque de optimización dinámica para analizar las decisiones óptimas de uso del suelo, contemplando tres usos excluyentes del mismo: conservación, agricultura y minería. Se encuentra que al incluir el valor de los servicios ecosistémicos en las decisiones de uso del suelo hace que resulte óptimo conservar por lo menos el 74% del área del páramo y que tener en cuenta potenciales externalidades negativas de la minería aumenta el área óptima a conservar y a dedicar a actividades agrícolas, mientras que el área óptima de extracción minera disminuye en más del 75%.

Keywords: High mountain ecosystem, Ecosystem services, Land use conflicts, Opportunity costs, Dynamic optimization

Palabras clave: Ecosistemas de alta montaña, Servicios ecosistémicos, Conflicto de uso del suelo, Costos de oportunidad, Optimización dinámica

Clasificación JEL: C61, D04, D62, D61, Q01, Q15, Q32, Q51, Q57

Primera versión recibida el 21 de noviembre de 2014; versión final aceptada el 5 de diciembre de 2014

Coyuntura Económica. Vol. XLIV, No. 2, Diciembre de 2014, pp. 61-104. Fedesarrollo, Bogotá - Colombia

* Información de contacto: lauracalderon5@gmail.com. Documento realizado como tesis para la Maestría en Economía (PEG) de la Universidad de los Andes. Agradezco la valiosa asesoría de Jorge Higinio Maldonado y también los comentarios y sugerencias de Guillermo Rudas, Ramón Rosales, Ana María Ibáñez y Mauricio Romero.

I. Introducción

Los páramos son ecosistemas estratégicos para la conservación de la diversidad ecológica que proveen una amplia variedad de servicios ambientales, entre los cuales se destacan la producción y regulación hídrica. Colombia posee la mayor superficie de los páramos del mundo (SPNN, 2013) y uno de ellos es el Páramo de Santurbán, que produce el agua que abastece a más de dos millones de habitantes de Bucaramanga y de otros municipios de la región. Además de su importante oferta hídrica, el Páramo de Santurbán también es rico en otros servicios ecosistémicos, alberga recursos minerales y sus suelos son cada vez más usados para la producción agrícola. Esto genera conflictos entre los diferentes usuarios de los bienes y servicios ofrecidos por el páramo, pues las actividades mineras, así como las agropecuarias, tienen un impacto negativo sobre la cantidad y calidad de los servicios ambientales provistos.

A pesar de esfuerzos recientes y de un creciente interés por promover un desarrollo sostenible, el componente ambiental sigue siendo una preocupación secundaria en comparación con los objetivos de crecimiento económico en el corto plazo para Colombia; la explotación de los recursos naturales se considera uno de los principales medios de desarrollo económico (DNP, 2010) y sus impactos ambientales son muchas veces ignorados o subvalorados. Este hecho se debe, en parte, a que el valor económico total de los servicios ambien-

tales no es incorporado en la toma de decisiones sobre uso del suelo. Como consecuencia de fallas de mercado en la asignación de este tipo de bienes y servicios, la mayoría de beneficios derivados de ellos tienen características de bienes públicos, lo que tiene serias implicaciones sobre su uso y conservación.

En este contexto, se hace relevante contar con estudios técnicos que enriquezcan la discusión sobre el uso que se debe dar a ecosistemas estratégicos como los páramos, de manera que se maximice el bienestar de la sociedad a través de una administración eficiente de los recursos. Para esto, es necesario tener en cuenta tanto los costos como los beneficios derivados de las diferentes actividades que se pueden desarrollar en el territorio y resulta útil analizar un caso particular en donde se presenten conflictos asociados al uso del suelo. El Páramo de Santurbán es un caso de estudio interesante por su importancia ecológica y por la coyuntura actual de conflicto de uso del suelo entre conservación, minería y agricultura que presenta, y porque las decisiones que se tomen sobre este caso puntual, seguramente servirán de lineamiento para futuras tomas de decisiones sobre el uso de otros ecosistemas estratégicos en el país.

Con el fin de determinar cuál es el área del Páramo de Santurbán que se debería conservar para maximizar el bienestar social, este trabajo pone en la balanza el valor de los servicios ecosistémicos que este páramo provee y los beneficios

económicos que se pueden derivar de la explotación de los recursos mineros o del desarrollo de actividades agrícolas, usando un modelo de optimización dinámica que permite evaluar las disyuntivas intertemporales que surgen al tomar decisiones sobre el uso del suelo. Inicialmente se establece el área óptima de conservación para el Páramo de Santurbán cuando se tienen en cuenta los servicios ambientales que este ecosistema provee, asumiendo que su valor es conocido con certeza. A través de un análisis de sensibilidad de las variables que afectan el área a conservar, se determina cuál es el efecto que cambios en estas variables pueden tener sobre el uso óptimo del suelo, esto con el fin de ilustrar escenarios que permitan hacer recomendaciones de política relevantes para la toma de decisiones sobre la conservación de los páramos en el país. Este trabajo encuentra que el área óptima a conservar es por lo menos el 74% del área total del páramo y que el resto debe dedicarse a actividades agrícolas y mineras. Sin embargo, el área óptima destinada a minería se ve reducida en más del 75% cuando las externalidades negativas que esta actividad puede generar son tenidas en cuenta. Adicionalmente, reconociendo que existe incertidumbre sobre el valor futuro de los servicios ecosistémicos y que las decisiones de transformación de estos ecosistemas son irreversibles, se comparan los resultados obtenidos con un escenario en donde los beneficios ambientales no se conocen con certeza y cambian en el tiempo, y se encuentra que puede resultar óptimo conservar una fracción mayor del área de estudio.

El documento está compuesto por siete secciones. La primera es esta introducción. La segunda sección ilustra la importancia de los páramos en términos de provisión de servicios ecosistémicos y describe fallas de mercado asociadas a la provisión de estos servicios. En la tercera sección se presenta una caracterización de la zona de estudio y en la cuarta se describe la estrategia empírica. En la quinta sección se presentan los datos de los costos de uso del suelo utilizados para el desarrollo del estudio. La sexta sección presenta los resultados de uso óptimo del suelo y el análisis de sensibilidad ante cambios en parámetros claves. Por último, la séptima sección consiste en una discusión de los resultados y recomendaciones de política.

II. Antecedentes

A. Los páramos: ecosistemas estratégicos, frágiles y amenazados

Los ecosistemas de páramo se encuentran ubicados en las partes superiores de la zona norte de la cordillera de los Andes, aproximadamente entre los 3000 m.s.n.m. y las nieves perpetuas, alrededor de los 4500 m.s.n.m. Sin embargo, el límite inferior de los páramos es variable según la latitud, la vertiente, el clima global y la actividad humana (Hofstede, 2003; Ospina y Rodríguez, 2011). Según los estudios más recientes, en Colombia los páramos cubren 2,9 millones de hectáreas (ha), es decir el 2,5% de la extensión continental del país (IAvH, 2013a), pero las autoridades am-

bientales aún no han reconocido la totalidad del área identificada como páramo; actualmente son reconocidas 1.925.410 hectáreas identificadas por Morales *et al.* (2007).

Los páramos son estratégicos para la conservación de la diversidad ecológica y para la provisión de servicios ecosistémicos, en particular por su potencial de almacenamiento de agua, su capacidad de regulación hídrica y recarga de acuíferos, en donde nacen los principales sistemas hídricos de abastecimiento de la población (MAVDT, 2010; Buytaert *et al.*, 2012). La conjunción del clima y las características de su vegetación y suelos hacen que los páramos se constituyan en reguladores naturales de la escorrentía y además presenten un fenómeno de precipitación horizontal, que representa entre el 15% y el 60% de la precipitación vertical (Aldrich *et al.*, 2000; Díaz-Granados *et al.*, 2005). Dada la alta capacidad de producción y regulación hídrica, el agua proveniente de los páramos andinos es ampliamente utilizada para consumo, irrigación y generación de energía eléctrica (Buytaert *et al.*, 2006). En Colombia, los páramos son el lugar en donde nacen los principales ríos del país, aportan el 4% de la oferta hídrica superficial y regulan el 70% de los ríos en sus cabeceras (MADS, 2002), garantizando una oferta hídrica constante y mitigando efectos derivados de eventos de precipitación extremos.

Por otra parte, los páramos son muy importantes en términos de biodiversidad ya que cuentan con numerosas especies de plantas¹ (Kappelle & Horn, 2005) y con altas tasas de diversificación de éstas (Madriñán *et al.*, 2013). Cerca del 90% de su flora es endémica, el 8% del total de endemismos de la flora nacional se encuentra en estos ecosistemas y son el hábitat de múltiples especies polinizadoras y dispersoras de semillas (Sanclemente, 2011). La riqueza en biodiversidad y la belleza escénica del paisaje de páramo constituye un atractivo importante para turistas. Por ejemplo, en el año 2012 el Parque Nacional Natural Chingaza ubicado al oriente de Bogotá recibió a más de 13.800 visitantes y entre 2007 y 2012 presentó una tasa promedio de crecimiento en el número de visitantes de 26%. (MADS y SPNN, 2012). Además, los páramos han tenido históricamente un valor cultural importante para las comunidades que los habitan o se benefician directamente del agua que allí se produce (Cárdenas *et al.*, 1996).

Adicionalmente, el ecosistema de páramo presenta bajas tasas de mineralización y reciclaje de nutrientes, las cuales favorecen una lenta pero continua absorción de dióxido de carbono (CO₂) que se acumula como parte de la materia orgánica de los suelos. Los contenidos de carbono son altos en las capas superficiales del suelo (20%-30%) y algunos autores afirman que estos ecosistemas pueden al-

¹ 3.400 especies de plantas vasculares y 1.300 de plantas no vasculares según Kappelle y Horn (2005).

macenar más carbono que la selva tropical si se tiene en cuenta el suelo (García, 2003; Hofstede, 2003).

Los páramos son reconocidos como ecosistemas estratégicos en la legislación colombiana y en ellos "no se podrán adelantar actividades agropecuarias, ni de exploración o explotación de hidrocarburos y minerales, ni construcción de refinerías de hidrocarburos" (Ley 1450 de 2011, art. 202). Sin embargo, en la práctica esto no se cumple y desde hace muchos años los páramos han sufrido procesos de ocupación que han generado profundas transformaciones en los ecosistemas, principalmente por el desarrollo de la ganadería extensiva, la agricultura y en algunas ocasiones la minería (Sanclemente, 2011). La ganadería extensiva y el cultivo de papa que cada vez emplea más maquinaria que compacta el suelo, fertilizantes y pesticidas, tienen una repercusión negativa en la cantidad y calidad de los servicios hídricos prestados por los páramos (Morales *et al.*, 2007). No obstante, las actividades agropecuarias y mineras en zonas de páramo son la principal fuente de ingresos para un número importante de familias, el 12% del área total de páramo en Colombia ha sido transformada, y más del 80% de los complejos de páramo presenta algún tipo de intervención de este tipo².

Recientemente, con el crecimiento del sector minero-energético y su consolidación como sector

estratégico para la economía nacional (DNP, 2010) se han presentado conflictos entre los objetivos de aumentar la inversión extranjera y la producción de este sector, y la protección y manejo de los recursos naturales. Los páramos no han sido ajenos al desarrollo minero; a pesar de que actualmente las zonas de páramo se consideran excluidas de la minería, se calcula que para el año 2011 se habían otorgado 451 títulos mineros en zonas de páramo en un área de 106.000 hectáreas (CGR, 2011). Esto se debe a que el suelo de algunos páramos es rico en minerales con un alto valor comercial y hay interés en explotar estos recursos por parte de empresas nacionales e internacionales. Sin embargo, este desarrollo entra en conflicto directo con la provisión de servicios ecosistémicos de los páramos ya que esta actividad contamina las fuentes hídricas y los suelos por el uso intensivo de químicos como el cianuro y el mercurio, los altera por la remoción de la tierra y utiliza grandes cantidades de agua (Soto, 2011). En particular, afecta el régimen hidrológico local tanto de las aguas superficiales como subterráneas (Guerrero, 2009). Adicionalmente, no se tiene certeza sobre la magnitud de los efectos negativos en el largo plazo y los pasivos ambientales que genera (Rodríguez *et al.*, 2012). Según el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH) la calidad de los servicios ecosistémicos provistos por los páramos está asociada a la preservación de la integridad ecológica de todos

² Cálculos propios con base en Cabrera y Ramírez (2014).

los componentes del ecosistema y la intervención minera en los ecosistemas de alta montaña va en detrimento de la provisión de servicios ambientales, "con poca o ninguna garantía de restauración de su funcionalidad, aún en el mediano o largo plazo, dadas las limitaciones biofísicas para la formación de suelos orgánicos y comunidades vegetales propias del páramo" (IAvH, 2011, pág. 22). No existen suficientes estudios que cuantifiquen los impactos de la minería sobre el medio ambiente en Colombia, pero por ejemplo, en el caso del Páramo de Pisba en Boyacá, un estudio reciente encontró evidencia de altos niveles de acidez y conductividad en los cursos de agua relacionados con minería de carbón, indicando que posiblemente existan metales pesados o arsénico solubilizados en las aguas ácidas. Esto corrobora las impresiones de habitantes locales que aseguran que los cuerpos de agua en contacto con la minería de carbón están contaminados. Además, se encontraron condiciones de inestabilidad en las montañas con la posibilidad de que se generen deslizamientos de tierra (El Tiempo, 2014). Palmer *et al.* (2008) revisan varios estudios sobre los impactos ambientales de la minería en zonas de alta montaña en Estados Unidos que revelan que los impactos no son mitigables y que generan pérdidas ecológicas irreversibles, afectando principalmente la regulación hídrica y la biodiversidad, además de generar contaminación que afecta la salud humana. También se ha encontrado evidencia para Ghana de que la minería de oro no sólo afecta el área directamente intervenida, sino que también tiene efectos negativos sobre la productividad agrícola

en zonas aledañas a la explotación minera (Aragón y Rud, 2013).

Los páramos son ecosistemas frágiles que se degradan fácilmente ante intervenciones antrópicas debido a que la capacidad de retención hídrica y la permeabilidad que los caracteriza se ven disminuidas drásticamente una vez se pierde la estructura porosa del suelo por pisoteo, arado o desecación, y esta degradación muchas veces es irreversible, al menos en una escala de tiempo humana (Podowesky y Poulenard, 2001; Buytaert *et al.*, 2006; Buytaert *et al.*, 2007; Morales *et al.*, 2007). Este fenómeno además de afectar la cantidad y calidad del agua, repercute sobre el control de inundaciones y la operación segura, económica y eficiente de las represas que abastecen de agua a la población y generan energía (Sáenz y Mulligan, 2007). El Fondo de Adaptación (2013) considera que en Colombia este hecho es cada vez más evidente, pues la degradación de los ecosistemas de páramo ha contribuido a que en las recientes temporadas invernales se hayan presentado fenómenos catastróficos como inundaciones, deslizamientos y avalanchas que han sido costosos para el país. Por ejemplo, el reciente fenómeno de la niña (2010-2011) que causó daños que pusieron al país en situación de emergencia social, económica y ecológica, y cuyo costo ascendió a aproximadamente 2% del PIB (OECD, 2014), puso en evidencia la importancia de estos ecosistemas y mostró las consecuencias de su degradación. Esto, pues la deforestación del bosque alto andino y la pérdida de páramos que regulan

los flujos de agua, reduce su capacidad de respuesta de estos ecosistemas para mitigar las consecuencias de eventos climáticos extremos (BID y Cepal, 2012). Si se consideran las predicciones de futuros escenarios de cambio climático que indican que eventos de precipitación extrema serán cada más vez más intensos y más frecuentes (IPCC, 2013), la regulación hídrica cobrará mayor importancia.

Por otra parte, el cambio en la cobertura de suelo rico en materia orgánica libera el carbono almacenado a la atmósfera contribuyendo a la emisión de gases de invernadero. De igual manera, incide en pérdidas de biodiversidad y afecta la belleza paisajística de la cual las personas disfrutan para llevar a cabo actividades recreativas.

B. Servicios ecosistémicos y fallas de mercado

A pesar de la importancia de los ecosistemas de alta montaña y de su fragilidad ante intervenciones antrópicas, estos han sido y continúan siendo deteriorados. La degradación de ecosistemas estratégicos como los páramos se debe en gran parte a que en la planeación ambiental y toma de decisiones sobre el uso de los recursos naturales, los beneficios derivados de los ecosistemas en estado natural no son tomados en cuenta de manera completa, por lo que los paisajes productivos y multifuncionales continúan siendo transformados en paisajes más simples como monocultivos, o convertidos a tierras o ecosistemas infértiles (De Groot, 2006).

Existen varios factores que explican por qué los beneficios que se derivan de los ecosistemas en estado natural no son tenidos en cuenta de manera completa. En primer lugar, las características de propiedad de los servicios ambientales generan fallas de mercado, lo que tiene como consecuencia que su asignación sea ineficiente (Baumol y Oates, 1988; Pearce *et al.*, 1990). En segundo lugar, hace falta información sobre el valor de los servicios ecosistémicos (Balmford *et al.*, 2002); en el caso de los páramos falta conocimiento científico y económico de las funciones ecosistémicas y de cómo las diferentes actividades económicas afectan la capacidad de estos ecosistemas para proveer servicios ambientales (Buytaert *et al.*, 2007). Por último, aun cuando los servicios ecosistémicos son reconocidos y valorados, en muchos casos el valor que se les asigna es inferior a su valor real (De Groot, 2006).

La mayoría de los bienes y servicios ecosistémicos cuentan con características de bienes públicos, lo que tiene implicaciones importantes tanto para su uso como para su conservación. Por definición, los bienes públicos, dadas sus características de no rivalidad y no exclusión, generan fallas de mercado que llevan a que su asignación sea subóptima (Baumol y Oates, 1988), pues los beneficios de los ecosistemas naturales son percibidos como externalidades positivas a nivel local, regional e incluso global, que no tienen un valor de mercado (Cole, 2002; Mann *et al.*, 2012). En este sentido, la conversión del suelo de ecosistemas complejos generalmente sólo genera beneficios para el agen-

te privado que interviene el ecosistema, mientras que los costos asociados a la pérdida de servicios ambientales (externalidades negativas) se reparten entre un grupo difuso de usuarios y generaciones futuras, teniendo un impacto insignificante sobre quienes obtienen los beneficios derivados de la transformación (De Groot, 2006).

A pesar del aumento en los estudios de valoración económica de servicios ambientales que proveen los ecosistemas en estado natural, muchos ecosistemas no cuentan con valoraciones de este tipo, lo que genera fallas de información. En particular, hace falta mayor información sobre cómo cambia la capacidad de los ecosistemas para proveer bienes y servicios a medida que aumentan los impactos antrópicos y cómo se ve reflejado esto en términos monetarios (Balmford *et al.*, 2002). Adicionalmente, aun cuando los servicios ecosistémicos son valorados, dada la complejidad ecológica de los ecosistemas naturales, es difícil definir el valor total que se deriva de los servicios ambientales prestados por un ecosistema en estado natural, lo que generalmente conlleva a una subestimación del valor real de los servicios ecosistémicos (Costanza *et al.*, 1997; De Groot *et al.*, 2010).

Si bien existen limitaciones de información importantes, con las valoraciones económicas disponibles, se ha evidenciado que los ecosistemas en estado natural pueden llegar a generar mayores beneficios para la sociedad que cuando son intervenidos para el desarrollo de actividades productivas.

Balmford *et al.* (2002) revisan numerosos estudios de valoración económica de servicios ambientales y concluyen que el beneficio neto del flujo de servicios ecosistémicos de un ecosistema intacto sobrepasa el flujo de beneficios de un ecosistema intervenido en la mayoría de casos. Para el caso colombiano, Carriazo *et al.* (2003) estiman los beneficios del aporte económico del Sistema de Parques Nacionales Naturales a la economía nacional y encuentran que éstos superan ampliamente los recursos financieros para su administración y mantenimiento. Otros estudios que incorporan una aproximación del valor económico total de los ecosistemas para determinar el uso que se debería hacer de los recursos naturales con el fin de maximizar el bienestar social, muestran que las decisiones óptimas de explotación de recursos y del uso del suelo cambian de manera importante cuando el valor de los servicios ecosistémicos es tenido en cuenta de manera integral. En muchos casos, se ha encontrado que el valor total de un uso multifuncional de un ecosistema en estado natural genera mayores beneficios que los que podrían generar los ecosistemas convertidos (Naido y Ricketts, 2006; Olschewski y Benítez, 2010; Barua *et al.*, 2012; Mann *et al.*, 2012; Alvarez, 2013). Por ejemplo, para el caso de un ecosistema de alta montaña en Colombia, Alvarez (2013) encuentra que el valor por hectárea de los beneficios del bosque de roble asciende a 2.5 veces el valor de la actividad económica alternativa, el cultivo de papa.

Por otra parte, algunos autores han encontrado que incluir un componente de incertidumbre so-

bre el valor de los servicios ecosistémicos, que es ignorado en modelos determinísticos, y considerar el beneficio de retardar la conversión del suelo mientras se genera mayor conocimiento sobre los futuros costos y beneficios asociados a dicha conversión, aumenta el área que resulta óptimo conservar en estado natural (Conrad, 1997; Bulte *et al.*, 2002; Girma *et al.*, 2012). En particular, cuando la decisión de desarrollar actividades económicas causa una transformación irreversible del ecosistema, la combinación de los factores de irreversibilidad e incertidumbre implica una ganancia asociada a la precaución y el retraso de la conversión del suelo natural (Pindyck, 2006). Esto se explica porque la expansión de posibilidades mediante la preservación de opciones alternativas representa beneficios para la sociedad en el futuro y reduce los beneficios netos de una actividad económica con costos ambientales (Arrow y Fisher, 1974).

Adicionalmente, dentro de los factores críticos para determinar el uso óptimo del suelo se destacan el costo de oportunidad de la conservación y las expectativas sobre los precios de los servicios ecosistémicos en el futuro (Adams y Turner, 2012). Por su parte, la tasa de descuento social juega un papel fundamental cuando se están evaluando los beneficios de los bienes y servicios ambientales, ya que la mayoría de los impactos sobre estos se perciben en el largo plazo. Esta tasa refleja la valoración del bienestar de hoy en relación con el bienestar en el futuro y tiene implicaciones importantes en la asignación de recursos: una tasa muy alta

puede impedir el desarrollo de proyectos públicos deseables, mientras que una tasa muy baja puede resultar en inversiones ineficientes (Zhuang *et al.*, 2007; Nordhaus, 2008). Adicionalmente, hay un creciente interés en la literatura por el uso de tasas de descuento hiperbólico, es decir, tasas que decrecen el tiempo, dándole un mayor peso al presente y al futuro lejano, y menor peso a tiempos intermedios bajo el supuesto de que la preferencia intertemporal de los individuos es decreciente en el tiempo. Esto tendría implicaciones importantes en la toma de decisiones sobre el uso de recursos naturales que afectan la disponibilidad de los mismos en el futuro lejano (Weitzman, 2001; Farmer & Geanakoplos, 2009; Correa, 2008). Sin embargo, no existe un consenso sobre la tasa de descuento que debería ser usada para este tipo de proyectos, donde las tasas usadas en diferentes países oscilan generalmente entre 3% y 15%, siendo más bajas en las economías más desarrolladas (Zhuang *et al.* 2007).

III. El caso del Páramo de Santurbán: uso del suelo actual y características socioeconómicas

El Páramo de Santurbán se encuentra ubicado en la Cordillera Oriental y tiene influencia directa en 20 municipios de los departamentos de Santander y Norte de Santander. Según la delimitación del IAvH a escala 1:100.000 (Sarmiento *et al.*, 2012), cuya delimitación del complejo de páramo Jurisdicciones-Santurbán-Berlín (JSB) será la referencia para este estudio, el complejo está ubicado

principalmente en las zonas altas de los municipios de Silos, Mutiscua, Arboledas, Vetas y Cucutilla, ocupando 142.608 ha. entre los 2800 msnm y los 4300 msnm. Alrededor del 68% del área del páramo se encuentra en territorio de Corpono³, el 28% en territorio de la CDMB⁴ y el 4% en territorio de la CAS⁵. El 24% del área total cuenta con alguna figura de protección reconocida: de las zonas protegidas, el 57% corresponde a la figura de Parque Natural Regional, que excluye explícitamente las actividades agropecuarias y mineras.

En cuanto al estado de conservación, el 28%⁶ del área total del complejo JSB presenta algún grado de transformación o reemplazo de la cobertura de suelo original y se encuentra cubierta principalmente por cultivos y pastizales, y predominan los cultivos de papa y cebolla y la ganadería extensiva. La tenencia de la tierra se caracteriza por pequeños predios que pertenecen, en su mayoría, a campesinos que se dedican a actividades agropecuarias (García, 2013). Sin embargo, es importante notar que en los últimos años empresas mineras han adquirido grandes áreas en los municipios de Vetas y California. Se estima que la población de los municipios sobre los cuales el páramo tiene influencia directa

asciende a 382 mil habitantes y que un total de casi 9 mil habitantes se encuentran ubicados al interior de los límites del páramo; de estos, 1.210 habitantes corresponden a población que vive en las zonas urbanas del municipio de Vetas (551 habitantes) y en la cabecera del corregimiento de Berlín, en el municipio de Tona (669 habitantes) (IAvH, 2013b).

Este páramo es catalogado como una "estrella fluvial" por el Ideam (2006) pues pertenece a las áreas hidrográficas Caribe, Magdalena-Cauca y Arauca y a siete subzonas hidrográficas, especialmente las cuencas de los ríos Lebrija, Zulía y Chitagá. Actualmente Santurbán produce y regula el agua consumida por más de 2.450.000 habitantes del área metropolitana de Bucaramanga, Cúcuta, Pamplona y de más de 20 municipios adicionales de la región, así como el agua utilizada por el sector agropecuario, los distritos de riego en Norte de Santander y por una central de energía termoelectrica (IAvH, 2013b). Además de las funciones de regulación y producción asociadas al recurso hídrico, este ecosistema provee otros bienes y servicios ambientales que generan un flujo de beneficios para la sociedad como lo son la captura de carbono en sus suelos, las oportunidades de recreación deri-

³ Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental.

⁴ Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

⁵ Corporación Autónoma de Santander.

⁶ Cálculos propios con base en IAvH (2013b).

vadas de la belleza escénica del paisaje y el soporte de la biodiversidad que alberga, así como también ofrece oportunidades para desarrollar cultivos agrícolas y alberga importantes recursos mineros.

Históricamente se han desarrollado actividades agrícolas y se ha extraído oro y plata en este páramo, lo cual ha generado una serie de conflictos asociados al uso del suelo, ya que la agricultura y la minería repercuten de manera negativa sobre la capacidad del ecosistema de proveer servicios ecosistémicos. La minería en la región había sido explotada a pequeña escala hasta finales de la década del 2000 cuando llegaron grandes empresas mineras con la intención de desarrollar proyectos a gran escala. Si bien la minería de oro y plata es la principal actividad económica los municipios de Vetás y California, su participación en la producción nacional es menor⁷. Actualmente existen varias empresas que tienen títulos mineros y predios en zona de páramo, así como en zonas de sub-páramo y bosque andino en donde adelantan labores de exploración, desarrollo, preparación y explotación. Según el IAvH (2013b) se encuentran traslapados dentro de los límites del páramo 65 títulos mineros que ocupan un total de 28.273 hectáreas, lo que corresponde al 20% del territorio

del páramo. El 81% del área titulada se encuentra concentrada en cinco empresas. En términos generales, hay una tendencia al incremento de capital extranjero que ha remplazado progresivamente a las pequeñas empresas familiares (IAvH, 2013b).

Las empresas que pretenden realizar explotaciones mineras subterráneas sostienen que este tipo de minería tiene el beneficio de que los impactos sobre el medio ambiente se pueden prevenir y son mitigables, pero según el IAvH (2011) y el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (Figuerola, 2010), este tipo de intervención tiene repercusiones irreversibles en la capacidad de provisión de servicios hídricos del páramo a pesar de que la superficie no se vea alterada de manera drástica. Si bien el debate actual sobre los conflictos de uso de suelo en Santurbán se centra en el tema minero, este conflicto se presenta sólo en algunos municipios del páramo, principalmente Vetás y California, mientras que en el resto de municipios la principal amenaza son los cultivos de papa y cebolla, y la ganadería extensiva (García, 2013).

La agricultura de papa y cebolla se concentra en la región suroccidental del páramo, principalmente en el municipio de Tona y la mayoría de los culti-

⁷ Entre el 2004 y el 2012 la producción de estos minerales en la región representó menos del 0.6% de la producción nacional de oro y del 0,03% de la producción nacional de plata. (Cálculos propios con base en el SIMCO [2013]. Los cálculos corresponden a la producción que paga regalías. Sin embargo, tanto los datos de producción local como nacional se pueden considerar subestimados, dado que una parte importante de la producción minera es informal y no se lleva una contabilidad precisa de este tipo de producción: según el Censo Minero I [2010-2011], de las 4133 Unidades de Producción Minera de oro censadas, el 86,7% no contaban con título minero [Martínez, 2013]).

vadores son pequeños propietarios con menos de una hectárea (IAvH, 2013b; García, 2013). Ambos cultivos son intensivos en el uso de maquinaria, pesticidas y fertilizantes. La región es la segunda abastecedora a nivel nacional de cebolla (IAvH, 2013b) y Santander es el cuarto departamento productor de papa (MADR, 2012). Los productos pecuarios predominantes el área de estudio son los bovinos y los ovinos y gran parte de los hogares cuentan con cabezas de ganado para la producción de leche para el consumo del hogar y en algunas ocasiones, para la venta. Adicionalmente, se observa que muchas veces las personas no usan exclusivamente el área de su predio para el pastoreo de sus animales, sino que también los llevan a pastar a zonas fuera de su predio (García, 2013). A partir de una encuesta realizada por Fedesarrollo a los habitantes de la parte alta de los municipios ubicados en el Páramo de Santurbán, se encuentra que la mayor parte se dedica principalmente a actividades agropecuarias (50%), a labores del hogar (31%) y a actividades mineras (10%) (García, 2013).

En ausencia de políticas que regulen el uso del suelo en este ecosistema estratégico, seguramente la frontera seguiría expandiéndose y se desarrollarían proyectos mineros a gran escala en los municipios de Vetás y California. Frente a esta situación han surgido varias propuestas de declaratoria de zona de reserva natural, pero hasta ahora sólo se

han declarado dos zonas de protección: el Parque Regional Sisavita en Norte de Santander en 2007 (12.000 ha) y el Parque Regional Páramo de Santurbán en 2013 (11.700 ha), dentro del cual hay 30 títulos mineros en la actualidad (IAvH, 2013b).

IV. Estrategia empírica

A. Inclusión del valor de los beneficios que brindan los ecosistemas

Para tomar una decisión adecuada sobre el uso que debe darse al Páramo de Santurbán es necesario incorporar la mayor información posible sobre los servicios ambientales que este ecosistema provee y sobre sus valores económicos, así como de los potenciales ingresos que se pueden derivar de los proyectos productivos en el páramo, para hacer un análisis adecuado que permita hacer un uso eficiente al recurso. Identificar los valores de los servicios ecosistémicos de la manera más completa posible, para así contar con una buena aproximación del valor económico total del ecosistema, constituye uno de los principales retos en la planificación ambiental. De Groot (2006) y recientemente la iniciativa TEEB⁸ propone un marco para el manejo integrado de las funciones y los valores de los ecosistemas con el fin de lograr un uso de suelo adecuado que maximice los beneficios de la sociedad (De Groot *et al.*, 2010).

⁸ "Economía de los ecosistemas y la biodiversidad".

En primer lugar, es necesario traducir la complejidad de los ecosistemas en un número manejable de funciones ecosistémicas. Estas funciones, a su vez, proveen los bienes y servicios ambientales que son valoradas por los seres humanos. La literatura de los servicios ecosistémicos ha identificado un rango amplio de funciones ecosistémicas, así como de bienes y servicios asociados a ellas, que pueden ser clasificadas en cuatro grupos: funciones de provisión, de regulación, de hábitat y de servicios culturales (Helliwell, 1969; Constanza *et al.*, 1997; Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

Una vez se han identificado las funciones del ecosistema, la naturaleza y la magnitud del valor que la sociedad le asigna a dichas funciones puede ser determinada a partir de los bienes y servicios provistos por los aspectos funcionales del ecosistema en cuestión. La valoración de estos bienes y servicios ecosistémicos, que la mayoría de veces carece de mercado, debe hacerse por medio de técnicas de valoración económica como los métodos de valoración contingente, costos evitados, precios hedónicos, entre otros. De igual forma, se debe considerar cómo varía la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos y el valor de los mismos ante diferentes intervenciones a los ecosistemas naturales. Sin embargo, es necesario tener presente que una valoración monetaria completa de todos los servicios que presta el ecosistema, incluyendo los valores de uso y de no uso, es difícil en la práctica, pero que sí es posible hacer una aproximación dadas las limitaciones de información.

B. Manejo óptimo de recursos naturales y modelo de bosques

La complejidad y vulnerabilidad del ecosistema de páramo hace que la intervención humana lo afecte de manera severa y su renovación tarde muchos años (Sarmiento *et al.*, 2003; IAVH, 2011). Por esta razón, en este trabajo se trata el ecosistema de páramo como un recurso no renovable, lo cual implica que una vez intervenido no puede volver a su estado original ni puede prestar los mismos servicios ecosistémicos que cuando se encuentra en estado natural.

Con el fin de hacer un análisis que incorpore las disyuntivas particulares de uso del suelo que se presentan en el Páramo de Santurbán, se usa un modelo de optimización dinámica que considera decisiones de uso del suelo que tienen impactos intertemporales y permite modelar un problema de maximización del flujo de beneficios derivados de los diferentes usos que se pueden hacer del suelo, teniendo en cuenta una tasa de descuento social intertemporal. Dado el supuesto que el ecosistema de páramo es un recurso no renovable y por lo tanto, los servicios ambientales que presta son recursos no renovables, se usa un modelo de bosques naturales maduros propuesto por Conrad (1999) y Maldonado (2008) para determinar cuál es el área de conservación óptima en el páramo.

Como lo afirma Mann *et al.* (2012), asignarle un valor económico a los servicios ambientales

no implica que todos los ecosistemas deban ser preservados. Desde una perspectiva económica convencional, los servicios ambientales son manejados de manera eficiente cuando el beneficio marginal derivado de las rentas generadas por el cambio en el uso del suelo son iguales a las pérdidas marginales que se dan por la pérdida o deterioro de servicios ambientales ocasionadas por este cambio. Los beneficios marginales del cambio de uso del suelo son medidos en términos de la renta que genera la agricultura de papa pastusa y la minería de oro, que son las actividades económicas predominantes en el área del Páramo de Santurbán. Los costos marginales del cambio del suelo están asociados a valores económicos de cuatro servicios ambientales: producción y regulación hídrica, soporte de biodiversidad, recreación y captura de carbono y a externalidades negativas que se pueden generar por la extracción minera.

1. Modelo de ecosistemas naturales maduros

El supuesto clave detrás del modelo de bosques naturales maduros es que el bosque natural (en este caso, el páramo) es un sistema complejo que una vez talado pierde sus atributos ecosistémicos y su recuperación no es posible por medio de una plantación directa. Si el supuesto mencionado se cumple, la dinámica de las reservas de páramo en estado natural (S), que es una variable de estado, se puede representar por $S_{t+1} = S_t - h_t$, la ecuación de evolución del estado, en donde h_t es el número de hectáreas intervenidas en el período t .

Asumiendo que el flujo de bienes y servicios ambientales esperados no relacionados con actividades económicas productivas en el período t es una función de las reservas de páramo en estado natural $A_t = A(S_t)$, en donde A_t es el valor monetario de los servicios ambientales del ecosistema no intervenido y S_t el área de ecosistema no intervenido, medida en hectáreas. El modelo supone que la función A_t es cóncava ($A_t'(S_t) > 0, A_t''(S_t) < 0$), ya que a medida que se tiene una mayor área de páramo conservada se obtienen más beneficios, pero su contribución marginal es cada vez menor. Esto coincide con las estimaciones realizadas por De Groot *et al.* (2012) que indican que el valor de los servicios ecosistémicos presenta retornos decrecientes a escala en función del tamaño del área de estudio, y además es razonable pensar que el valor de los servicios ecosistémicos que no tienen sustitutos (*e.g.* la provisión de hábitat para especies endémicas) aumente rápidamente a medida que la oferta disminuye (Balmford *et al.*, 2002).

En este modelo aplicado al caso del ecosistema de páramo, la conversión del ecosistema natural en cada período t , h_t , libera el carbono almacenado causando un costo neto N para la sociedad, por cada hectárea intervenida. Una vez que el suelo es modificado, puede ser dedicado a dos actividades productivas diferentes y excluyentes: agricultura o minería, que generan cada una un flujo de beneficios descontados π_{agr} y π_m , respectivamente, que son función del área dedicada a cada una de estas actividades.

De esta forma, el flujo de beneficios W en un período particular t resulta de la suma de los beneficios ambientales generados durante ese período, los costos netos N de la pérdida de carbono en ese período y los beneficios obtenidos por las actividades agrícolas y mineras en el terreno intervenido. Si r es la tasa social de descuento intertemporal, el flujo de beneficios, W , está dado por:

$$W_t = A(S_t)Nh_t + r * \pi_{agr}(S_{agr,t}) + r * \pi_m(S_{m,t}) \quad (1)$$

Para determinar qué área conservar y qué área transformar para obtener los beneficios de la transformación y de las actividades alternativas, el planificador central debe tener en cuenta todos los beneficios de todos los períodos posibles, considerando un factor de descuento δ , lo que equivale maximizar la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t \{A(S_t) + Nh_t + r * \pi_{agr}(S_{agr,t}) + r * \pi_m(S_{m,t})\} \\ & \text{s.a. } S_{t+1} = S_t - h_t; S_0 > 0; S_0 = S_t + S_{a,t} + S_{m,t} \end{aligned} \quad (2)$$

Al derivar las condiciones de primer orden (CPO) del problema intertemporal se obtienen las condiciones usuales de un problema estático (siempre y cuando se cumplan las condiciones de que las funciones A , π_{agr} y π_m sean cóncavas y las restricciones convexas). En algún momento se debe detener la transformación del ecosistema, bien sea porque el páramo en estado natural se ha agotado o porque resulta más rentable preservarlo que transformarlo para dedicarlo a otras actividades. Entonces, la solución más probable de este mode-

lo es que existe un período $0 \leq t \leq T$ en el cual la transformación del ecosistema sea positiva y un período $t \geq T$, en el cual sea cero. En ese momento se habrá alcanzado el estado estacionario y se tendrá:

$$h^* = 0 \text{ y } S^* = S \geq 0$$

Al remplazar estas dos condiciones en la CPO respecto a h_t se tiene que $N = \delta \lambda^*$, lo cual implica que $\lambda^* = (1+r)N$. Remplazando estas condiciones en las CPO respecto a S_t , S_{agr} y S_m se obtienen dos ecuaciones con dos incógnitas, que permiten solucionar el modelo en estado estacionario y encontrar el área a conservar en el largo plazo.

$$A' r \pi'_{agr}(S_{agr}) + rN \quad \text{con } N \leq 0 \quad (3)$$

$$r \pi'_{agr}(S_{agr}) = r \pi'_{min}(S_0 - S_t - S_{agr}) \quad (4)$$

Estas condiciones implican que, de un lado, se debe intervenir el ecosistema hasta que el valor marginal de los servicios ambientales iguale el costo de conversión del suelo más el beneficio neto de la actividad alternativa y, de otro lado, los beneficios marginales de la minería y la agricultura, deben ser iguales.

A partir de este modelo se hace un análisis de sensibilidad que permite ilustrar cómo varían los resultados ante la inclusión de posibles cambios en los parámetros claves del modelo como lo son los precios de los minerales, de los productos agrícolas y de los servicios ecosistémicos. Adicionalmente

se hace una ampliación al modelo que permite incluir posibles externalidades negativas que se derivan de la actividad minera, como se presenta a continuación.

2. Externalidades de la actividad minera

Para incluir en el análisis las repercusiones negativas que puede ocasionar la extracción de oro, en primer lugar, se considera una situación en donde el desarrollo de la minería afecta los beneficios marginales de la conservación y de la agricultura, de manera que cada unidad de área dedicada a minería, causa una pérdida de los beneficios generados tanto por los servicios ecosistémicos, como por la producción agrícola al interior del páramo. Para esto, se incluye en el modelo un parámetro $\theta \in [0,1]$ que representa el porcentaje de pérdida generado por la actividad minera, como se puede ver en la ecuación (5). En segundo lugar, se considera una externalidad que asume que la minería de oro afecta los beneficios derivados de actividades agrícolas en zonas aledañas a la explotación minera, como consecuencia de la contaminación que esta actividad genera. Con base en los resultados de Aragon y Rud (2013) para Ghana, que indican que la contaminación generada por la minería de oro a gran escala puede reducir la productividad de los cultivos que se encuentran ubicados en un radio de 20 km a la explotación minera en más del 25%, se hace una aproximación al costo generado por cada hectárea de explotación minera, sobre las actividades agrícolas fuera del área del Páramo,

E. De esta forma, el problema de maximización cuando se consideran externalidades negativas de la actividad minera es:

$$\begin{aligned} \max \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t \{ & A(S_t) * (1 - \frac{\theta S_m}{S_0}) + N h_t + r * \pi_{agr} \\ & (S_{agr,t}) * (1 - \frac{\theta S_m}{S_0}) + r * \pi_m (S_{m,t}) - E * S_{m,t} \} \quad (5) \\ \text{s.a. } S_{t+1} = & S_t - h_t; S_0 > 0; S_0 = S_t + S_{a,t} + S_{m,t} \end{aligned}$$

En donde θ representa la fracción de pérdida de productividad agrícola generada por cada hectárea dedicada a actividades agrícolas y E el costo asociado a la pérdida de productividad agrícola en los alrededores de la explotación minera.

3. Cambio en el valor futuro de los servicios ecosistémicos

Adicionalmente, teniendo en cuenta que la conversión de ecosistemas naturales no sólo puede ser irreversible, sino que además existe incertidumbre sobre muchos de los beneficios que proveen estos ecosistemas en estado natural y no se conoce el valor que estos tendrán en el futuro, es importante considerar el valor de cuasi opción (Azqueta, 2007). Para esto resulta relevante considerar un escenario que tenga en cuenta tanto la irreversibilidad de la intervención en un ecosistema de páramo, como la incertidumbre asociada a los beneficios que se derivan de su conservación, en particular si se considera que existe la oportunidad de generar mayores conocimientos sobre el ecosistema en el futuro (Conrad, 1997; Bulte *et al.*, 2002; Girma *et al.*, 2012).

El cambio en el valor de los servicios ecosistémicos puede ser positivo (por ejemplo, si la escasez del agua aumenta y como consecuencia su valor también lo hace o si en el futuro aumenta la demanda por estos servicios) o negativo (en caso de que, por ejemplo, desarrollos de nuevas tecnologías permitan descontaminar el agua y tratarla a menores costos). De Groot *et al.* (2012) encuentran que variables socioeconómicas como el ingreso per cápita de los países incide en la valoración de los servicios ecosistémicos y que la mayor parte de los servicios ecosistémicos tienen un valor más alto en países con mayores ingresos. Adicionalmente, el tamaño de la población incide de manera positiva en el valor de los servicios ecosistémicos, pues ésta afecta directamente la demanda por estos bienes y servicios. Si se tiene en cuenta que el crecimiento del PIB per cápita en Norte de Santander y Santander ha sido en promedio del 2,4% y del 4,4% anual, respectivamente, para los últimos diez años (DANE, 2012) y que según las proyecciones del DANE (2011a) el crecimiento anual de la población hasta el año 2020 para los departamentos de Santander y Norte de Santander será, en promedio, del 0,48% y 0,85% respectivamente, y además se considera un escenario de cambio climático en donde la frecuencia de eventos de precipitación extremos sean más frecuentes y de mayor magnitud (IPCC, 2013), es razonable pensar que el valor de los servicios ecosistémicos prestados por el Páramo de Santurbán aumente en el tiempo.

En ausencia de series de tiempo del valor de los servicios ecosistémicos, en algunos estudios la

tasa de cambio del valor de los beneficios derivados de estos servicios en el tiempo se ha calibrado a partir de las expectativas del precio de los bonos de carbono (Bulte *et al.*, 2002; Girma *et al.*, 2011) y del número de visitas a la zona de estudio, como aproximación al valor de recreación (Conrad, 1997). En este trabajo, para incluir el componente de cambio del valor de los servicios ambientales en el futuro, la tasa de crecimiento de este valor se calibra a partir de proyecciones del consumo de agua de la ciudad de Bucaramanga que es una de las principales beneficiarias de los servicios ecosistémicos del páramo de Santurbán. Por lo tanto, el supuesto crítico de esta estimación es que la tasa de crecimiento del consumo de agua de Bucaramanga es proporcional la tasa de crecimiento del valor de los servicios ecosistémicos, que no es observable. A partir de una serie de tiempo del consumo de agua mensual de Bucaramanga para los años 2003 a 2013 (SUI, 2013), se estima un modelo ARIMA (2,1,3), que es el que mejor se ajusta a los datos considerando pruebas de raíz unitaria y el criterio de información AIC, AICc y BIC, con base en el algoritmo de Hyndman & Khandakar (2008) (Anexo 1). Con base en los resultados de esta estimación, se simulan 10.000 caminos que puede tomar el proceso estocástico de las tasas de crecimiento de la demanda de agua para los próximos doscientos años. A partir de estas simulaciones, se asume que el valor de los servicios ecosistémicos crece a esta misma tasa y se estima el área óptima a conservar para cada una de las tasas del crecimiento del valor de los servicios ecosistémicos en el futuro estima-

do. En promedio, la tasa de crecimiento anual del consumo encontrada es 0,6%. Es importante tener en cuenta que las proyecciones de tan largo plazo distan de ser exactas y presentan gran varianza a medida que se amplía el horizonte de la proyección, sin embargo dado que el valor de los servicios ecosistémicos es descontado en el tiempo, el error de estimación se ve disminuido.

4. Limitaciones

Este enfoque resulta útil para analizar disyuntivas que se presentan a la hora de tomar decisiones sobre el manejo de recursos naturales, pero es necesario tener presentes sus limitaciones cuando es aplicado al caso del Páramo de Santurbán, que es particularmente complejo. La primera de ellas es que el páramo es un ecosistema complejo que no es homogéneo y sus características biofísicas varían con la altitud, pero el modelo asume que el ecosistema de páramo es homogéneo. Adicionalmente, el modelo incluye sólo algunos de los servicios ecosistémicos que presta el Páramo de Santurbán, por lo que el resultado del ejercicio es un límite inferior del área que debería dedicarse a la producción de servicios ecosistémicos asociados a la producción y regulación de agua, recreación y conservación de la biodiversidad. En el mismo sentido, la ausencia de información exacta sobre las externalidades que puede generar la minería de oro hace que la inclusión de estas externalidades no sea completa, ya que el valor de las externalidades mineras no se conoce con certeza y no se

incorpora el valor de las externalidades asociadas a la salud. Finalmente, los precios utilizados en el modelo no incluyen sus relaciones económicas (precios cuenta), que pueden llegar a ser diferentes en diferentes contextos; por ejemplo, la mano de obra puede tener un precio sombra diferente para la actividad minera que para la actividad agropecuaria.

V. Costos de oportunidad de los usos del suelo en el Páramo de Santurbán

Para resolver el problema de optimización dinámica propuesto se requiere de una gran cantidad de información sobre costos y beneficios de los potenciales usos del suelo en el Páramo de Santurbán: es necesario contar con cifras de las actividades económicas que se pueden llevar a cabo en el Páramo de Santurbán y de los beneficios económicos que se derivan de ellas, así como de los servicios ecosistémicos que el ecosistema provee. Por esta razón se recurre a diversas fuentes de información, y a partir de una extensa revisión de la información disponible para el Páramo de Santurbán y para otros lugares con características similares se seleccionan los datos que mejor se ajustan a la zona de estudio. Para estimar los costos y beneficios de la agricultura y minería se usan precios de mercado y no se tiene en cuenta el precio sombra del empleo. Sin embargo, debido a que en Colombia el desempleo es alto y que la intensidad de mano de obra de ambas actividades es diferente, los beneficios netos estimados podrían variar al considerar

precios cuenta (Stiglitz, 2000; Azqueta, 2007)⁹. A continuación se presentan las estimaciones de cada una de las alternativas de uso de suelo que serán usados para la construcción del modelo¹⁰.

A. Agricultura

Para estimar los beneficios de la producción agrícola se tiene en cuenta la producción de papa pastusa que es uno de los principales productos cultivados en el Páramo de Santurbán, junto con el cultivo de cebolla junca. La producción agrícola depende de diversos factores tales como el clima, la calidad del suelo, el uso de fertilizantes, la habilidad del productor, la pérdida de cosechas, entre otros, y por lo tanto presentan una gran varianza (Cuadro 1).

Los ingresos netos anuales agrícolas en términos monetarios por hectárea, cuando se considera

que los rendimientos son constantes para toda el área del páramo, están dados por:

$$\pi_a(S_{agr}) = P_i * Q_i(S_{agr}) - C_i(S_{agr}) \quad (6)$$

En donde P_i es precio de mercado de cada producto agrícola, Q_i es la cantidad producida en términos de toneladas por área plantada y C_i son los costos de producción del área plantada. Para calcular estas variables, se estima un promedio a partir de diferentes fuentes (Cuadro 1).

Bajo el supuesto de que a medida que se expande la frontera agrícola se usan tierras menos productivas, se asume que la función de producción agrícola es cóncava en el área total cultivada en la zona de páramo. Este supuesto es particularmente importante en zonas de páramo, pues en estos ecosistemas la productividad de la tierra decae

Cuadro 1
INGRESOS DEL CULTIVO DE PAPA

	Producción (Tn/ ha/año)	Precio promedio (COP/tn)	Ingresos/ha	Costos/ha	Ingresos netos (COP/ha/año)
Promedio	15,8	\$706,67	\$10.197.604	\$9.183.906	\$1.013.698
s.d.	4,63	\$108	\$3.274.844	\$2.174.157	\$3.274.844

Fuente: Elaboración propia con base en: Producción: Barrera (2008), CDMB y Corponor (2002), DANE (2011b), DANE (2011c) y Perfetti (2012). Precio mayorista promedio en 2012: Agronet (2013). Costo: Fedepapa (2012), Perfetti (2012) y Alvarez (2013).

⁹ La tasa de desempleo en el año 2013 ha sido de alrededor del 9% (DANE, 2013). En el 2012 el sector agrícola representó el 6,2% del PIB y generó el 17,4% del empleo, para el sector minería y petróleo estas cifras son del 7,7% y el 1,2% respectivamente. (Martínez, 2013).

¹⁰ Todas las cifras monetarias corresponden a pesos colombianos (COP) del 2012 y la tasa de cambio empleada es 1800 COP por dólar estadounidense.

de manera importante a medida que aumenta la altitud y, a partir de los 3.600 metros, generalmente no resulta rentable cultivar.

B. Minería

Para calcular los ingresos derivados de la minería se usa información de los ingresos esperados de una explotación minera a gran escala. En ausencia de información sobre reservas de oro estimadas para toda el área de estudio, se toma como referencia el proyecto de Angostura que pretende extraer aproximadamente 2,7 millones de onzas de oro¹¹ con una producción anual promedio de 269,000 oz durante 10 años (Golder Associates, 2012) y es uno de los principales proyectos de explotación de oro en el departamento de Santander. El Cuadro 2 presenta las ganancias esperadas del proyecto de Angostura tomando un precio del oro de \$USD1.100 por onza y una tasa de descuento del 6%. Para el desarrollo de este proyecto están contemplados tres años de inversiones y a partir del cuarto año se empiezan a generar ganancias derivadas de la explotación.

Como en el caso de la producción agrícola, se considera que la minería tiene rendimientos marginales decrecientes con respecto al área explo-

tada, ya que los costos de extracción pueden ser reservo-dependientes (Mason, 2011) y hay zonas que albergan mayores reservas de oro, mientras que en otras probablemente no hay. Por ejemplo, en el caso del proyecto de Angostura, en un título de 5.245 hectáreas se contempla explotar 200 hectáreas.

Para estimar el valor de las externalidades sobre la producción agrícola que podría derivarse de una explotación de oro, en términos monetarios por hectárea, se considera una explotación minera de un kilómetro de radio (314 hectáreas), asumiendo que se pierde el 25% de la productividad agrícola en el área afectada¹² y que el 50%¹³ de esta área

Cuadro 2		
INGRESOS ESPERADOS MINERÍA DE ORO		
Rubro	Millones COP	VPN/ha (millones COP)
Ingreso bruto	1.913.405	9.567
Otros costos	166.622	833.000
Regalías	111.534	558.000
Impuestos	302.728	1.514
Ingreso después de impuestos	614.629	3.073
Inversión	888.606	4.443
Ingreso neto	1.196.194	5.981
VPN del Proyecto (ingreso neto - inversión)	307.588	1.538
Fuente: Elaboración propia con información de Golder Associates (2012).		

¹¹ Los recursos minerales no constituyen reservas, por lo tanto su viabilidad económica no está garantizada.

¹² Estimado con base en pérdidas de rendimientos agrícolas encontradas por Aragón & Rud (2013).

¹³ Corresponde al porcentaje promedio del área de los departamentos de Santander y Norte de Santander dedicada a actividades agropecuarias.

está dedicada a actividades agropecuarias. El valor de la pérdida se calcula a partir del PIB agrícola promedio anual por hectárea cultivada en los departamentos de Santander y Norte de Santander.

C. Conservación

Determinar los beneficios derivados de la conservación es uno de los principales retos, ya que no se cuenta con un mercado que establezca un precio para los bienes y servicios que provee el Páramo de Santurbán en estado natural. Sin embargo, es posible hacer una aproximación al valor de los beneficios derivados de la conservación a partir de diferentes fuentes de información que permiten calcular los beneficios que presta este ecosistema en términos de pesos por hectárea (COP/ha). Para este estudio, la función de beneficios ambientales está compuesta por cuatro servicios ecosistémicos de los muchos que presta el Páramo de Santurbán: provisión hídrica, regulación hídrica, soporte de biodiversidad y recreación, así como la captura de carbono representada en el costo de transformación del ecosistema. Esto implica que se está valorando un límite inferior del valor de los servicios ambien-

tales provistos por el páramo ya que no se están teniendo en cuenta otros servicios ambientales que genera. Para algunos servicios ecosistémicos se cuenta con valoraciones de estudios realizados específicamente para el Páramo de Santurbán, pero para los casos en que no se cuenta con información específica del valor que provee esta zona en particular, se hace una transferencia de beneficios¹⁴ a partir de otros estudios para zonas con características similares.

Para estimar el valor económico de la provisión hídrica del Páramo de Santurbán, se estima tanto la oferta como la demanda hídrica a partir de estudios de las corporaciones autónomas regionales que tienen jurisdicción sobre el páramo de Santurbán, en particular a partir de planes de manejo y ordenamiento de cuencas (POMCA) de los ríos Suratá y Cáchira y de un estudio realizado por Cercapaz (2012) para el río Zulia¹⁵. Como se puede ver en el Cuadro 3, la demanda hídrica es inferior a la oferta para las tres cuencas, pero los índices de escasez¹⁶ son diferentes en cada caso, siendo alto para la cuenca del río Zulia, medio para la subcuenca del Suratá y bajo para Cáchira.

¹⁴ La transferencia de beneficios consiste en la utilización de los valores monetarios de bienes y servicios ecosistémicos ambientales estimados para un caso particular, para estimar los beneficios de un bien o servicio similar para un caso similar del cual se desconoce su valor.

¹⁵ Los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA) mencionados, tienen información detallada sobre la oferta y demanda de agua.

¹⁶ Metodología IDEAM (2010). Índice escasez = (Demanda/Oferta)*100. Un índice superior al 40% se considera "Alto", entre 20-40% "Medio", 10-20% Moderado y menor a 10% bajo.

Cuadro 3
OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA (M³)

Cuenca	Uso doméstico	Uso agropecuario*	Uso Termoeléctricas	Total demanda	Oferta total (m ³ /año)	Oferta demanda	Índice escases (%)
Zulia*	29.134	441.504	220.752	691.390	1.592.568	901.178	43,41
Suratá**	69,57	316	0	69.886	279,094	209.207	25,04
Cáchira***	492	1.763	0	2.255	606.742	604.487	0,37
Total m ³	99,196	443.583	220.752	763.531	2.478.403	1.714.872	30,81

Fuente: Elaboración propia con datos de: Cercapaz * (2012), CDMB ** (2009) y CDMB *** (2010).

Para la valoración del servicio de provisión hídrica se usa el precio promedio del agua en Bucaramanga para el caso doméstico y para el agua destinada a usos agrícolas e industriales, se usan valores estimados por Aylward (2010). Este valor es multiplicado por el consumo de agua y dividido entre el área total del páramo en estado natural con el fin de obtener un valor en términos de COP/ha. El servicio de regulación hídrica, que garantiza la oferta hídrica constante en épocas secas y disminuye la magnitud de los caudales extremos en épocas de lluvia, se valora por medio de una transferencia de beneficios a partir de un estudio de De Groot (2012) que recopila una serie valoraciones económicas de múltiples servicios ecosistémicos en diferentes ecosistemas, en donde el valor estimado para el Páramo de Santurbán corresponde al promedio entre el valor del servicio para ecosistemas de humedales no costeros, bosques tropicales y pasturas. Este estudio también es usado para valorar el servicio de soporte de biodiversidad.

La disminución en los sedimentos generados por la erosión de las cuencas, reduce los costos de tratamiento del agua que potabilizan los acueductos, así como la vida útil de la infraestructura de los mismos. Gutiérrez y Díaz-Granados (2004), mediante la modelación hidrológica de la cuenca del río Tona, que nace en Santurbán, calculan los costos que representa para el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) el tratamiento de los sedimentos generados por la alteración de la cobertura natural del suelo y estos costos se emplean para valorar la calidad del agua.

El valor asociado al servicio de recreación se estima a partir de un estudio de García (2013) que calcula el valor de recreación total para el páramo de Santurbán usando la metodología de costo de viaje. Este estudio también valora la captura de carbono atmosférico, estableciendo que cada hectárea de páramo en estado natural retiene en promedio 79,8 toneladas de carbono. Tomando un valor de \$USD10 por tonelada de carbono, se tiene que el

beneficio en términos monetarios asociados a este servicio es de \$USD798 por hectárea. El Cuadro 4 presenta un resumen del valor estimado de los servicios ecosistémicos provistos por el páramo de Santurbán en términos monetarios por hectárea.

D. Aproximación de funciones

Para capturar la concavidad en las funciones de los beneficios derivados de las tres actividades alternativas que se pueden llevar a cabo en el páramo, se hace una aproximación logarítmica para cada una de las alternativas de uso del suelo a partir de los datos descritos en la sección anterior, siguiendo a Conrad y Ludwig (1994) y a Álvarez (2013).

Para estimar la función de beneficios que puede generar la extracción del oro en todo el páramo se asume que sólo una fracción del área tiene depósitos mineros que son económicamente viables. Para esto, se toma como límite superior de las posibilidades

de intervención el porcentaje del área del título minero del proyecto de Angostura que efectivamente se planea explotar. Con este escenario, se realiza una aproximación logarítmica, de la misma forma que para el caso de los servicios ecosistémicos y la agricultura, como se puede ver en el Gráfico 1.

A partir de esta aproximación de las funciones de beneficios generados por los diferentes usos del suelo se estima el uso óptimo del mismo.

VI. Resultados

A. Solución al problema de optimización dinámica: aproximación al uso del suelo óptimo en el Páramo de Santurbán

A partir de los datos descritos en la sección 5 y de las funciones de beneficios estimadas para cada uno de los usos del suelo alternativos predominantes en el Páramo de Santurbán, se resuelve el problema

Cuadro 4

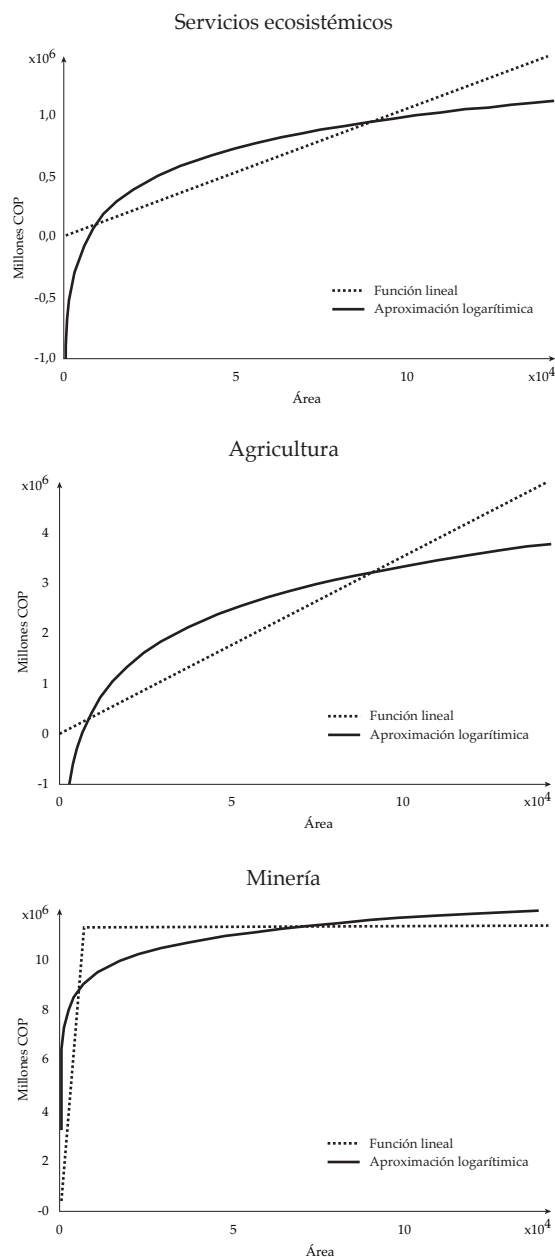
VALOR DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES EN EL PÁRAMO DE SANTURBÁN

Servicio ecosistémico	COP/ha/año	Fuente	Metodología
Provisión hídrica	\$2.878.954	AMB, CDMB, Cercapaz (2011), Aylward(2010)	Precio de mercado
Regulación hídrica	\$5.353.200	De Groot (2012)	Transferencia beneficios
Calidad del agua (sedimentos)	\$31,818	Díaz-Granados (2004)	Costos evitados
Biodiversidad	\$2.224.800	De Groot (2012)	Transferencia beneficios
Recreación	\$13,912	Fedesarrollo (2013)	Costo de viaje
Total	\$10.502.684		

* Valoraciones para el Páramo de Santurbán.

Fuente: Elaboración propia con datos de: AMB (2012), Gutiérrez y Díaz Granados (2007), Aylward (2010), CDMB (2009), CDMB (2010), CERCAPAZ, De Groot (2012) y García (2013).

Gráfico 1 APROXIMACIÓN DE FUNCIONES



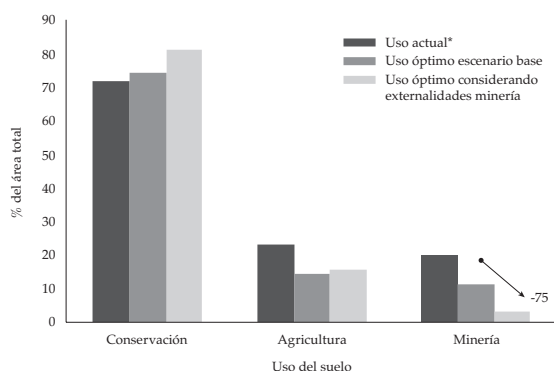
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos descritos en las secciones V.A a V.C.

de optimización dinámica, bajo este escenario base. Como se muestra en el Gráfico 2, se encuentra que para maximizar el flujo de beneficios que se pueden derivar del uso del suelo del Páramo de Santurbán, dado el objetivo del planificador central, y con la información disponible y utilizada en el modelo, resultaría óptimo conservar por lo menos el 74% del área del páramo, es decir un área mayor a la que se encuentra en estado natural actualmente (71,65%), y dedicar el 14% a actividades agrícolas y el 11% del área del páramo a actividades mineras, cuando las externalidades de esta actividad no son incluidas en el modelo. Sin embargo, incluir las externalidades de la minería en el análisis disminuye el área que resulta óptimo dedicar a actividades mineras en más del 75%, lo que equivale a una reducción de 12.093 hectáreas, y aumenta tanto el área a conservar, como el área a destinar a actividades agrícolas. Por lo tanto, el área que actualmente se encuentra en estado natural no debería ser transformada para el desarrollo de actividades productivas, pues ya ha sido transformada un área mayor a la que resulta óptimo transformar.

Estos resultados dan una noción de cómo debería ser usado el suelo en el Páramo de Santurbán para garantizar la maximización de beneficios sociales, no obstante, es necesario tener en cuenta que los parámetros utilizados son una aproximación al valor real de los mismos y que, además, éstos pueden fluctuar en el tiempo y que no se conoce con exactitud el impacto negativo de las actividades productivas dentro y fuera del páramo. Con el fin de determinar cómo cambia el área óptima de con-

servación en el páramo de Santurbán ante cambios en los parámetros más importantes del modelo, se hace un análisis de sensibilidad de la solución del problema de uso óptimo del suelo, ante variaciones en dichos parámetros y se incluyen externalidades potenciales de la minería.

Gráfico 2
USO ÓPTIMO DEL SUELO EN EL PÁRAMO DE SANTURBÁN



* En el caso de la minería el uso del suelo actual corresponde al área que cuenta con título minero.

Fuente: Elaboración propia.

B. Análisis de sensibilidad frente a cambios en parámetros claves

Los parámetros relevantes en el análisis corresponden a determinantes económicos (precio del oro, precio de productos agrícolas, valor de los servicios ecosistémicos y tasa de descuento) y a determinantes de los impactos que un uso particular del suelo puede tener sobre los beneficios económicos que se derivan de otros usos del suelo. Para hacer el análisis de sensibilidad a través de una estática

comparativa, se estima el impacto de aumentar (y disminuir) en un 10% el valor de cada uno de los parámetros económicos en la línea base (Cuadro 5) y en variar la magnitud de las externalidades derivadas de las actividades mineras, así como el impacto que tienen las actividades agrícolas sobre la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos del páramo (Cuadro 6). Se encuentra que los signos del cambio en los resultados del uso del suelo óptimo, ante cambios en los parámetros son intuitivos. Por ejemplo, si el valor de los servicios ecosistémicos se incrementa en 10% el área óptima a conservar aumenta, mientras que el área óptima dedicada a actividades agrícolas o mineras disminuye.

Este análisis permite identificar aquellos parámetros que tienen mayor incidencia en las decisiones de uso del suelo. El área óptima de conservación se ve afectada principalmente por cambios en los precios del oro y de la papa, que representan el costo de oportunidad de la conservación, y por el valor que se asigna a los servicios ecosistémicos. De igual manera, se observa que incorporar las externalidades mineras en la estimación, en particular por las externalidades sobre la producción agrícola y la provisión de servicios ecosistémicos al interior del páramo, tiene un efecto importante en el área a conservar, pues disminuye los beneficios netos que se pueden derivar de la minería.

Teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a la estimación del valor de los servicios ecosistémicos, este ejercicio incluye una estimación del

Cuadro 5

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE CAMBIOS EN PARÁMETROS ECONÓMICOS

Parámetro	Valor parámetro escenario base	Unidad % área	Aumento 10%				Disminución -10%			
			Valor parámetro	Conserv. %	Agr. %	Min. %	Valor parámetro	Conserv. %	Agr. %	Min. %
Escenario Base				74,16	14,48	11,36		74,16	14,48	11,36
Valor SE/ha	10,5	Mill. COP/tn	11,6	75,78 *	13,57	10,64	9,45	72,02	15,69	12,30
				2,19 **	-6,28	-6,28		-2,89	8,29	8,29
Precio oro	1.100	USD/onza	1210	68,78	13,46	17,76	990	81,41	15,86	2,73
				-7,25	-7,09	56,37		9,78	9,52	-75,98
Precio papa	0,71	Mill. COP/tn	0,8	68,93	20,49	10,57	0,6	81,13	6,47	12,40
				-7,05	41,48	-6,89		9,40	-55,32	9,16
Precio del carbono	10	USD/tn	11,0	74,20	14,46	11,34	9,0	74,11	14,51	11,38
				0,06	-0,16	-0,16		-0,07	0,19	0,19
Tasa de descuento	6	%	6,6	74,55	14,61	10,84	5,4	73,96	14,40	11,64
				0,53	0,85	-4,52		-0,27	-0,58	2,50

* Porcentaje del área total. **Cambio con respecto al escenario base.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE CAMBIOS EN PARÁMETROS BIOFÍSICOS

Parámetro	Valor parámetro escenario base	Unidad % área	Aumento				Disminución			
			Valor parámetro	Conserv. %	Agr. %	Min. %	Valor parámetro	Conserv. %	Agr. %	Min. %
Escenario Base				74,16	14,48	11,36		74,16	14,48	11,36
Externalidad fuera del páramo	0	Km	10,0	75,82	14,80	9,38	20,00	78,57	15,32	6,10
				2,24	2,18	-17,39		5,95	5,80	-46,25
Externalidad dentro del páramo (% pérdida Agr. y SE)	0	%	0	80,55	15,70	3,76	1	81,84	15,94	2,22
				8,61	8,37	-66,91		10,36	10,06	-80,46
Porcentaje pérdida SE por agricultura	1,00	%	0,9	72,45	16,19	11,36	0,8	70,45	18,19	11,37
				-2,30	11,75	0,04		-5,00	25,56	0,09
Disponibilidad de recursos mineros	5	%	5,5	72,74	14,21	13,05	4,5	75,61	14,76	9,63
				-1,91	-1,87	14,88		1,96	1,91	-15,20

* Porcentaje del área total. **Cambio con respecto al escenario base.

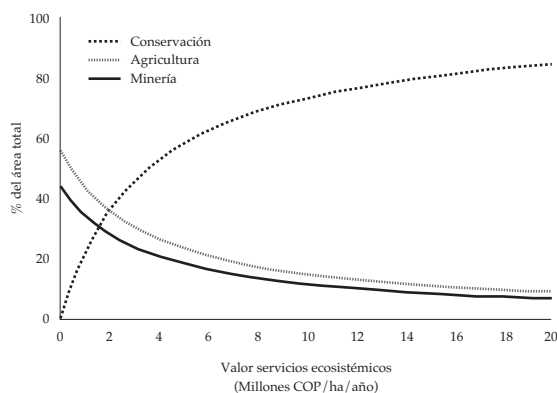
Fuente: Elaboración propia.

efecto de un rango amplio de valores asociados a los servicios ecosistémicos sobre el uso del suelo. Como se muestra en el Gráfico 3, a valores bajos de los servicios ecosistémicos, el área óptima de conservación aumenta de manera importante ante incrementos en este valor, mientras que cuando éste supera los 15 millones COP/ha, el área a conservar supera el 80% del páramo y el cambio marginal en el área a conservar es menor ante incrementos en el valor de los servicios ecosistémicos. Es decir que a valores bajos de los servicios ecosistémicos la respuesta es elástica, mientras que a valores altos esta elasticidad converge a 0,1.

Por otra parte, se observa que cambios en el precio del oro tienen efectos importantes sobre el uso del suelo óptimo, en particular sobre el área a dedicar a actividades mineras: según los resultados de este análisis, si el precio del oro cae por debajo

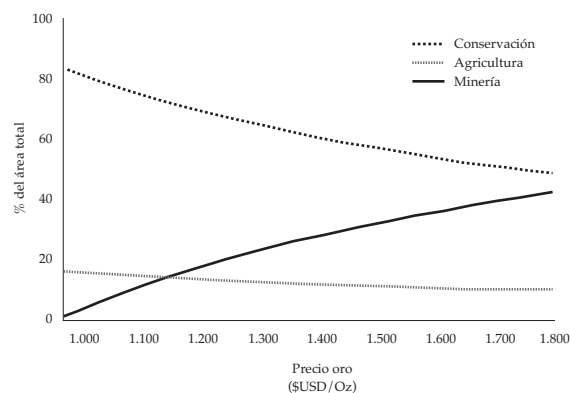
de 950 USD/oz los proyectos de extracción de oro a gran escala dejan de ser rentables, siendo óptimo conservar más del 82% del páramo y dedicar el resto del área a actividades agrícolas, cuando no son tenidas en cuenta las externalidades de la minería (Gráfico 4). Por el contrario, si el precio alcanza los 1.800 USD/oz resulta óptimo dedicar más del 40% del área del páramo a proyectos mineros, cuando no son tenidas en cuenta sus externalidades negativas. Este resultado es importante a la hora de tomar decisiones de inversión en proyectos de minería, pues el precio del oro fluctúa de manera considerable, ya que depende altamente de los mercados accionarios, al ser percibido como un activo de refugio en momentos en donde crece la aversión al riesgo. En años anteriores al 2009, el precio se ubicó por debajo de los 1.000 USD/Tn, mientras que en el año 2012 alcanzó un precio máximo de 1.770 USD/oz (UPME, 2013). En el mismo sentido, la disponibilidad de los

Gráfico 3
USO ÓPTIMO DEL SUELO EN FUNCIÓN DEL VALOR DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4
USO ÓPTIMO DEL SUELO FRENTE AL PRECIO DEL ORO



Fuente: Elaboración propia.

recursos mineros económicamente viables es un factor crítico para determinar el área que debe ser dedicada a la minería: una variación del 10% en este parámetro cambia el área óptima a de extracción minera en aproximadamente 15%.

En cuanto al efecto que tiene el precio de los productos agrícolas sobre el uso del suelo, se encuentra que el área óptima dedicada a la agricultura es muy sensible a cambios en este parámetro: un aumento del 10% en el precio de la papa se ve reflejado en un aumento de 41,81% en el área óptima a dedicar a actividades agrícola. Por otra parte, los resultados indican que el precio del carbono es uno de los parámetros que menos afecta los resultados de uso del suelo óptimo (Anexo 2G), de manera que mecanismos de pago por reducción de emisiones de gases de efecto invernadero serían poco efectivos para conservar este ecosistema y es necesario considerar otro tipo de mecanismos de compensación.

Con relación a la tasa de descuento social, se observa que cuando esta es del 6%, un aumento del 10% en este parámetro amplía el área óptima a conservar y a dedicar a actividades agrícolas, mientras disminuye el área óptima de explotación minera. En la literatura de la economía ambiental se ha reconocido que la tasa de descuento habitualmente empleada para evaluar proyectos sociales no resulta adecuada para evaluar proyectos con componentes ambientales de largo plazo y que es necesario recurrir a tasas de descuento específicas para este tipo de proyectos. En el problema analiza-

do en este trabajo se encuentra que la tasa de descuento tomada para el análisis tiene implicaciones importantes en los resultados, pero que una tasa de descuento alta no necesariamente disminuye el área a conservar, ya que esta presenta una forma de parábola en función de la tasa de descuento (Anexo 2I). El área óptima de conservación disminuye a medida que aumenta la tasa de descuento, hasta que ésta alcanza un nivel de 4,91% y el área óptima de la minería alcanza su máximo valor (11,54%). A partir de ese punto, a medida que aumenta la tasa de descuento, el área óptima que se dedica a la minería disminuye, mientras que el área óptima de conservación y de agricultura aumenta. Esto se debe a que la minería requiere de altas inversiones en los tres primeros años del proyecto y que los ingresos de la explotación minera se empiezan a recibir a partir del cuarto año.

Al analizar los efectos que tienen los parámetros de interacción entre los diferentes usos del suelo y los beneficios que cada uso puede generar, se encuentra que las externalidades ocasionadas por la minería son determinantes a la hora de definir el uso óptimo del suelo (Cuadro 6 y Gráfico 5). Cuando se considera que la minería de oro afecta el 25% de los beneficios derivados de la agricultura y de la provisión de los servicios ecosistémicos dentro del páramo, el área óptima a dedicar a actividades mineras disminuye en 67%, es decir en 10.837 hectáreas, mientras que el área óptima agrícola y de conservación aumentan en 9% y 8% respectivamente. Sin embargo, es importante reconocer que

la afectación de la minería sobre la agricultura (u otras actividades económicas) no se conoce con exactitud, en particular para Colombia, y por lo tanto, es necesario generar mayor conocimiento para tomar una decisión acertada.

En el mismo sentido, incluir los efectos negativos que la extracción de oro pueda tener sobre la agricultura fuera del páramo hace que el área a dedicar a actividades mineras disminuya en un 17,4% cuando se afecta la producción agrícola ubicada dentro de un radio de 10Km de la explotación minera y en un 46% cuando el radio es de 20Km (Cuadro 5). Además, se debe tener presente que la minería puede tener repercusiones negativas en la salud de las personas que trabajan y viven en el área de influencia de las minas, entre otras

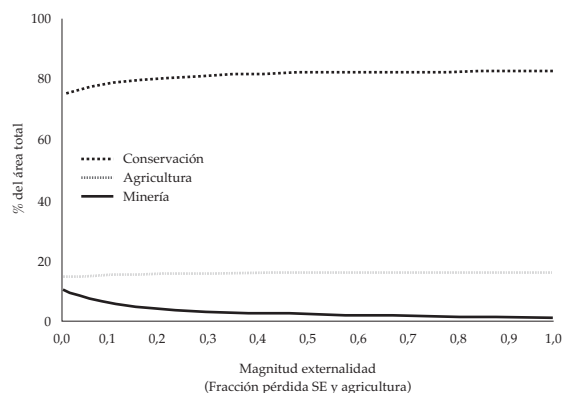
externalidades, por lo tanto es razonable asumir que las externalidades negativas consideradas en este estudio son un límite inferior del valor real de las externalidades que pueda causar la actividad minera. Generalmente, este tipo de externalidades está ausente en el debate y la omisión de estos costos sobreestima la contribución de las actividades extractivas a la economía y lleva a establecer políticas de compensación y mitigación insuficientes.

Por otra parte, si las pérdidas en la capacidad de provisión del páramo de servicios ecosistémicos generadas por la actividad agrícola no son totales sino parciales, y se pierde el 90% de ellos, el área óptima a dedicar a actividades agrícolas aumenta en un 11,75% y si se pierde el 80% de los servicios ecosistémicos aumenta en 25,56% (Anexo 2B). Este último resultado es relevante a la hora de decidir sobre el uso que se le va a dar al área de estudio, ya que puede ser óptimo dedicar una mayor fracción del área del páramo a actividades agrícolas cuando éstas tienen un menor impacto negativo sobre la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos del páramo. Sin embargo, aún hace falta mayor información sobre los impactos que pueden llegar a tener los cultivos agrícolas sobre la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos de los páramos.

C. Cambios en el valor futuro de los servicios ecosistémicos

Considerando que existe incertidumbre sobre el valor futuro de los servicios ecosistémicos del

Gráfico 5
USO ÓPTIMO DEL SUELO EN FUNCIÓN DE LA MAGNITUD DE LA EXTERNALIDAD MINERÍA SOBRE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y AGRICULTURA AL INTERIOR DEL PÁRAMO



Fuente: Elaboración propia.

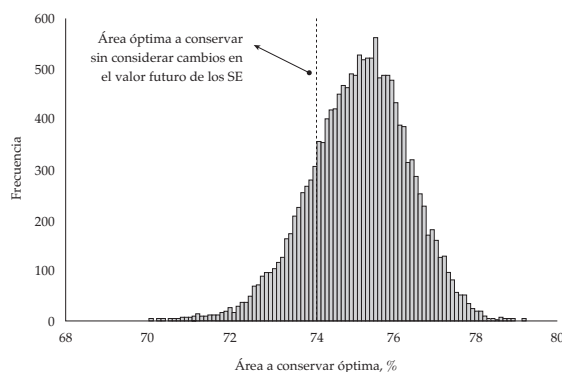
páramo, pero que es razonable que este valor aumente en los próximos años, se incluye un análisis que incorpora cambios en el valor futuro de los servicios ecosistémicos. Para esto se simula el valor futuro de los servicios ecosistémicos a partir de predicciones de la tasa de crecimiento del consumo de agua de la ciudad de Bucaramanga, la cual se abastece del agua proveniente del Páramo de Santurbán (Ver sección 4.B.). Como se puede ver en el Gráfico 6, la distribución del área óptima a conservar cuando se considera que en el futuro el valor de los servicios ecosistémicos estará relacionado con el consumo de agua de Bucaramanga, más del 78% de las simulaciones se ubican por encima del área que resulta óptimo conservar (74,16%) si no se tiene en cuenta este cambio en el tiempo. Esto indica que si se ignora el cambio que puede presentar el valor de los servicios ecosistémicos, el área de conservación percibida como óptima

puede ser subestimada, llevando a una pérdida de bienestar irreversible para la sociedad. Por lo tanto, es necesario interpretar los resultados con precaución y generar mayor conocimiento sobre el valor de los servicios ecosistémicos prestados por este páramo, sobre todo si se considera que la pérdida de servicios ecosistémicos es irreversible ante intervenciones antrópicas. Por ejemplo, ante incrementos en eventos de precipitación extrema como consecuencia del cambio climático, el valor de los servicios de regulación hídrica prestados por los páramos seguramente aumentará.

VII. Discusión y recomendaciones de política

A partir de un análisis de optimización dinámica que contempla tres usos alternativos y excluyentes del suelo (*i.e.* conservación, agricultura y minería) este estudio muestra que incluir el valor de los servicios ecosistémicos en las decisiones de uso del suelo del Páramo de Santurbán hace que resulte óptimo conservar por lo menos el 74% del área del páramo. Esto implica que la mayor parte de este ecosistema debe ser conservada y que la política óptima es conservar un área mayor de la que actualmente se encuentra en estado natural (72%), y mucho mayor al área que se encuentra bajo alguna figura de protección que limita el uso del suelo a la conservación (16%). Si bien en el Páramo de Santurbán existen más alternativas de uso del suelo de las que se consideran en este estudio, esta simplificación permite ilustrar el problema de la

Gráfico 6
DISTRIBUCIÓN ÁREA ÓPTIMA
A CONSERVAR



Fuente: Elaboración propia con base en DANE (2011a) y valoración de servicios ecosistémicos presentadas en la sección IV.

conversión de un ecosistema natural en proyectos productivos, en un mercado que no valora los servicios ecosistémicos.

Cuando se incluyen en el análisis las externalidades potenciales de la minería de oro a gran escala que generalmente no son tenidas en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre el desarrollo de este tipo de proyectos, el área que resulta óptimo dedicar a actividades mineras disminuye de manera significativa: en un escenario conservador de afectación de estas externalidades, el área que se debe dedicar a extracción de oro pasa de 11% a 3% del área total del páramo, lo que representa una disminución del 75%. Este resultado indica que es fundamental hacer que los proyectos mineros internalicen no sólo el daño que causan al ecosistema en el área que intervienen de manera directa, sino las repercusiones negativas que pueden llegar a tener fuera de ésta, tanto sobre la provisión de servicios ecosistémicos, como sobre el rendimiento de otras actividades productivas. No obstante, el análisis indica que si sólo se tienen en cuenta estas externalidades, es óptimo dedicar una fracción del Páramo de Santurbán (3%) a la explotación de oro y por lo tanto, una política que prohíba el desarrollo de actividades mineras en la totalidad del páramo no sería deseable, bajo estos supuestos. Este resultado debe ser interpretado con cautela pues, como se mencionó anteriormente, las externalidades consideradas en este ejercicio constituyen un límite inferior de las que potencialmente se pueden llegar a generar. Por esta razón resulta

razonable aplicar un principio de precaución, fundamentado en el reconocimiento de que los potenciales daños no se conocen con exactitud, pero son plausibles desde un punto de vista científico, y es recomendable que la carga de la prueba de que las afectaciones mineras no superan un cierto nivel de pérdidas ambientales repose sobre el responsable de realizar la explotación minera (Azqueta, 2007; Orduz & Uprimny, 2008). Además, es importante tener presente que el área dedicada a actividades mineras es muy sensible al precio del oro, que a su vez presenta grandes variaciones en el tiempo, de manera que si el precio cae, estas actividades dejan de ser rentables y se habrá deteriorado de manera irreversible un ecosistema estratégico.

Por otra parte, es de destacar que el área que resulta óptimo dedicar a actividades agrícolas es altamente sensible al nivel de afectación que estas actividades generan sobre la capacidad de los páramos de proveer servicios ecosistémicos. Por lo tanto, implementar prácticas agrícolas de menor impacto puede ser una alternativa para maximizar el bienestar, permitiendo que las personas que dependen de la agricultura en el Páramo de Santurbán puedan desarrollar sus actividades económicas de tal forma que el ingreso que deriven de ellas sea por lo menos igual al costo del daño que causan en términos de pérdida de servicios ecosistémicos. Para esto, es necesario conocer con exactitud cuál es el impacto que tienen los diferentes cultivos sobre la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos del páramo e implementar programas

que incentiven a los habitantes o dueños de la tierra en el páramo a desarrollar estos cultivos y mejorar sus prácticas de producción, por ejemplo, no usando maquinaria pesada que compacta el suelo y disminuyendo el uso de pesticidas y fertilizantes.

Adicionalmente, como el beneficio derivado de la conservación es de largo plazo, se deben considerar los posibles cambios que el valor de los servicios ecosistémicos pueda tener en el futuro, sobre todo cuando las decisiones de transformación del ecosistema en estado natural son irreversibles, pues de no ser tenidos en cuenta estos cambios se subestima el área que resulta óptimo conservar, generando una pérdida irrecuperable de bienestar para sociedad.

Una vez que se cuenta con una aproximación al uso óptimo del suelo para el área de estudio, el gran reto consiste en encontrar los mecanismos que permitan alcanzar este óptimo en la práctica, para que se preserven los ecosistemas estratégicos que proveen servicios esenciales para la sociedad y se desarrollen actividades productivas sustentables. Para ello, es necesario implementar políticas que corrijan las fallas de mercado que se generan a la hora de valorar y proveer servicios ecosistémicos, así como las fallas relacionadas con las externalidades que se derivan las actividades mineras. Se deben considerar mecanismos que van desde instrumentos de regulación directa (comando y control) como la creación de un área protegida en donde se restrinja el desarrollo de actividades mi-

neras y agrícolas, hasta instrumentos económicos que incentiven a los agentes privados a internalizar el costo de los daños que causan sus actividades productivas o les permitan percibir los beneficios de la conservación o de la implementación de mejores prácticas agrícolas. Además, dado que al tomar la decisión de asignar el suelo a un uso determinado algunos agentes privados se verían afectados de manera negativa, mientras que otros se verían beneficiados, es deseable encontrar métodos que compensen a los perdedores. Por ejemplo, en el caso de decidir conservar un área mayor, los habitantes de Bucaramanga se beneficiarían de los servicios de provisión y regulación hídrica, mientras los agricultores se verían afectados al no poder desarrollar sus actividades productivas. En este caso, encontrar un mecanismo que transfiera los beneficios que percibe la población de Bucaramanga para incentivar a los agricultores a conservar o adoptar prácticas agrícolas de menor impacto ambiental es necesario para garantizar un desarrollo ambiental y social sostenible en la región.

Dentro de los instrumentos económicos que han sido implementados en el mundo para promover la conservación de ecosistemas estratégicos en los últimos años se destacan los pagos por servicios ambientales (PSA), un instrumento de gobernanza ambiental en donde los beneficiarios de la conservación realizan pagos a los actores que deciden conservar, creando un mercado donde se encuentran la oferta y la demanda por servicios ambientales. Sin embargo, pasar de la teoría a la práctica ha mostrado

ser un gran reto al implementar esquemas de PSA: investigaciones recientes han encontrado evidencia empírica de que algunas iniciativas de PSA han generado poca oferta adicional de servicios ambientales y no han generado el aumento de eficiencia esperado, y que factores institucionales como las redes y organizaciones sociales, y las motivaciones intrínsecas de los agentes son claves para que estos esquemas funcionen (Hecken *et al.*, 2012). En el caso de la minería, los seguros y fianzas ambientales pueden constituir un instrumento para corregir o compensar daños que esta actividad pueda generar, dando certeza al cumplimiento de las condiciones establecidas al otorgar licencias ambientales para el desarrollo de este tipo de proyectos al garantizar que los potenciales causantes de daños ambientales cuenten con los recursos adecuados para corregir o compensar por los daños que puedan causar (Icaza & Piña, 2008). En suma, existen diferentes mecanismos que deben ser considerados para desarrollar instrumentos que se adapten a las particularidades de la zona de estudio. Probablemente sea necesario combinar varios instrumentos para acercarse a un uso óptimo del suelo en el Páramo de Santurbán y en otros ecosistemas estratégicos.

Por otra parte, teniendo en cuenta que los resultados indican que es óptimo dedicar, por lo menos, una fracción del páramo a cada uno de los usos del suelo analizados, es recomendable considerar las heterogeneidades que presenta el suelo del área estudiada, pues este estudio asume que éste es homogéneo. Esto permitiría contar con un plan de

manejo que proteja las zonas que tienen un mayor valor ecológico y que permita que el desarrollo de las actividades agrícolas y mineras se lleve a cabo en zonas en donde este valor sea menor. En particular, las explotaciones mineras deben ser desarrolladas en zonas en donde se minimice el valor de sus externalidades y al mismo tiempo se cuente con una concentración de reservas de oro que haga rentable el desarrollo del proyecto, siempre y cuando las externalidades negativas que pueda generar este tipo de actividad no superen los beneficios que pueda generar a la sociedad. Para esto se requiere mayor información de la riqueza ecológica al interior del área estudio. Dada la complejidad implica la toma de decisiones de uso del suelo en el Páramo de Santurbán, de los riesgos y de la relación entre factores ecológicos, económicos y sociales, el análisis presentado en este estudio debería ser considerado como un componente de una investigación interdisciplinaria de mayor alcance, e incorporar mayor información a medida que ésta esté disponible.

Los resultados del trabajo constituyen un elemento útil para los formuladores de política pública que deben tomar decisiones sobre el manejo que se debe dar al Páramo de Santurbán y a otros ecosistemas estratégicos del país. Esto es relevante si se considera que actualmente se está llevando a cabo la delimitación de los páramos y humedales en todo el país con base en criterios físicos y socioeconómicos y que, adicionalmente, se han establecido diferentes formas de protección en estos ecosistemas, que

algunos sectores consideran insuficientes para su conservación, mientras para otros éstas no deberían existir pues consideran que impiden el desarrollo económico de las regiones. Es indispensable lograr

entender y cuantificar tanto los costos como los beneficios que implica la conservación de ecosistemas estratégicos para asignar los recursos escasos de manera eficiente.

Bibliografía

- Adams, T., & Turner, J. (2012). An investigation into the effects of an emissions trading scheme on forest management and land use in New Zealand. *Forest Policy and Economics*, 15, 78-90.
- Agronet. (2013). *Precios históricos de la papa*. Recuperado el 20 de Junio de 2013, de Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: <http://www.agronet.gov.co/agronetweb1/Estad%C3%ADsticas.aspx>
- Aldrich, M., Bubb, P., & Hostettler, S. (2000). *Tropical montane forests: Time for action*. WWF International.
- Álvarez, A. (2013). Promoción de la Conservación de Bosque Natural de Roble mediante el pago por el Servicio Ambiental de Almacenamiento de Carbono: Un ejercicio de Optimización dinámica Aplicado en el Corredor Ecológico Guantiva-La-Rusia-Iguaque. *Documento CEDE* (12).
- AMB (2012). *Indicadores para el control social a las personas prestadoras de servicios públicos*. Bucaramanga: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
- Aragón, F., & Rud, J. P. (2013). *Modern industries, pollution and agricultural productivity: Evidence from Ghana*. London: International Growth Centre - LSE.
- Arrow, & Fisher. (1974). Environmental Preservation, Uncertainty and Irreversibility. *Quarterly Journal of Economics*, 312-19.
- Aylward, B., Seely, H., Harwell, R., & Dengel, J. (2010). The Economic Value of Water for Agricultural, Domestic and Industrial Uses: A Global Comparison of Economic Studies and Market Prices. *Ecosystem economics*.
- Azqueta, D. (2007). *Introducción a la economía ambiental* (Segunda ed.). Madrid: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA.
- Balmford, A., Bruner, A., Cooper, P., Constanza, R., Farber, S., Green, R., y otros. (2002). Economic Reasons for Conserving Wild Nature. *Science*, 297(5583), 950-53.
- Banco de la República de Colombia. (2013). *Banco de la República de Colombia*. Recuperado el 20 de Julio de 2013, de PIB total y por habitante: <http://www.banrep.gov.co/es/info-temas-a/4024>
- Barrera, V., Alwang, J., & Cruz, E. (2008). *Viabilidad socio-económica y ambiental del sistema papa-leche en la microcuenca del río Illangama-Ecuador*.
- Barua, S., Uusivuori, J., & Kuulvainen, J. (2012). Impacts of carbon-based policy instruments and taxes on tropical deforestation. *Ecological Economics*, 73, 211-219.
- Baumol, W. J., & Oates, W. E. (1988). *The theory of environmental policy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- BID y Cepal. (2012). *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia 2010-2011*. Bogotá: Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Comisión Económica para América y el Caribe (Cepal).
- Bulte, E., Van Soest, D., Kooten, G. C., & Shipper, R. (2002). Forest Conservation in Costa Rica when Nonuse benefits are uncertain but rising. *American Journal of Agricultural Economics*, 150-160.
- Buytaert, W., Celleri, R., De Bievre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., y otros. (2006). Human

- impact on the hydrology of the Andean Páramos. *Earth Science Review*, 79, 53-72.
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & Bievre, B. d. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean Páramo. *Forest Ecology and Management*, 22-30.
- Buytert, W., Céleri, R., & B. de Bievre, F. C. (2006). *Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, importancia y vulnerabilidad*.
- Buytert, W., Celleri, R., & B. De Bievre, F. C. (2012). Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, importancia y vulnerabilidad. En P. C. Mena Vásconez, *Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado*. Ecociencia/ Abya.
- Cabrera, M., & Ramirez, W. (2014). *Restauración Ecológica de los páramos de Colombia: Transformación y herramientas para su conservación*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Cárdenas, F., Cleef, A. M., Cortés, A., Flórez, A., González, F., Iriarte, P., y otros. (1996). *El páramo: Un ecosistema de alta montaña. Los páramos en las culturas indígenas*. Recuperado el 14 de septiembre de 2013, de Biblioteca virtual Luis Angel Arango: <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/faunayflora/paramo/paisa2.htm>
- Carriazo, F., Ibáñez, A. M., & García, M. (2003). Valoración de los beneficios económicos provistos por el Sistema de Parques Nacionales Naturales: Una aplicación del análisis de transferencia de beneficios. *Documento CEDE* 2003-26.
- CDMB (2009). *Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca del Río Suratá*. Bucaramanga: Corporación Autónoma para la Meseta de Bucaramanga.
- CDMB (2010). *Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca del Río Cáchira*. Bucaramanga: Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.
- CDMB, & CORPONOR (2002). *Estudios de caracterización y zonificación ambiental de la unidad biogeográfica de Santurbán. Informe final. Documento de Caracterización biofísica y socioeconómica, evaluación, prospectiva y zonificación ambiental. Versión Digital*. Bucaramanga: Corporación Autónoma para la Defensa de Bucaramanga y Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental.
- Cercapaz (2012). *Lectura integral de territorio sobre la zona de Santurbán-Sisavita*, Departamento de Norte de Santander. En Corponor, GIZ, Pconsult, & Ambero.
- CGR (2011). *Estado de los recursos naturales y del ambiente 2010-2011*. Bogotá, D.C.: Contraloría General de la República.
- CGR (2011). *Estado de los recursos naturales y del ambiente 2010-2011*. Bogotá, D.C.: Contraloría General de la Nación.
- Cole, D. (2002). *Pollution and property: comparing ownership institutions for environmental protection*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Conrad, J. M. (1997). On the option value of old-growth forest. *Ecological Economics*, 97-102.
- Conrad, J. M. (1999). *Resource Economics - Chapter 4: The Economics of Forestry*. New York: Cambridge University press.
- Conrad, J., & Ludwig, D. (1994). Forest land policy: the optimal stock of old-growth forest. *Natural Resource Modeling*, 8(1), 27-45.

- Correa, F. (2008). Tasa de descuento ambiental gamma: una aplicación para Colombia. *Lecturas de Economía - Universidad Nacional de Antioquia* (69), 143 - 162.
- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., y otros. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253 - 260.
- DANE (2011a). *Población y demografía: estimaciones de población 1985-2005 y proyecciones 2006-2020*. Recuperado el 20 de Julio de 2013, de Departamento Administrativo Nacional de Estadística: <http://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion>
- DANE (2011b). *Encuesta agropecuaria experimental a altitudes superiores a los 3000 m.s.n.m 2009*. Bogotá, D.C., Colombia: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- DANE (2011c). *Resultados de la Encuesta Nacional Agropecuaria ENA*. Bogotá, D.C.: Departamento Administrativo de Estadística Nacional.
- DANE (2012). *Cuentas departamentales de Colombia 2000-2012*. Bogotá, D.C.: Departamento Administrativo de Estadística.
- DANE (2013). *Principales indicadores de mercado laboral*. Bogotá, D.C.: Departamento Nacional de Administración Estadística.
- De Groot (2006). Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Urban planning and landscape*, 75, 175-186.
- De Groot, R., Fisher, B., Christie, M., Aronson, J., Braat, L., Haines-Young, R., y otros (2010). Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. En *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: The Ecological and Economic Foundations*. London: The Economics of Ecosystems and Biodiversity.
- De Groot, R; Brander, L; Van der Ploeg, S; Costanza, R; Bernard, F; Braat, L; Christie, M; Crossman, N; Ghermandi, A; Hein, L; Hussain, S; Kumar, Pushpam; McVittie, A; Portela, R; Rodriguez, L.C.; Ten Brink, P; Van Beuker, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1, 50-61.
- Díaz-Granados, M., Navarrete, J., & Suárez, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. (F. d. Andes, Ed.) *Revista de Ingeniería* (22), 64-75.
- DNP. (2010). *Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014*. Bogotá, D.C.: Departamento Nacional de Planeación.
- El Tiempo (20 de Noviembre de 2014). Minería contamina el agua y causa deslizamientos en Tasco (Boyacá). *El Tiempo*.
- Farmer, J. D., & Geanakoplos, J. (2009). Hyperbolic discounting is rational: Valuing the far future with with uncertain discount rates. (C. F. University, Ed.) *Cowles Foundation Discussion Paper* (No. 1719).
- Fedepapa (2012). *Costos de producción*. Recuperado el 10 de Junio de 2013, de Federación Colombiana de Productores de Papa: http://www.fedepapa.com/?page_id=419
- Figueroa, G. A. (2010). *Proyectos de gran minería en zonas productoras de agua. Caso Santurbán*. V Seminario de medio ambiente y servicios públicos. Bogotá, D.C.: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP.
- Fondo de Adaptación (2013). *Estudios previos para la suscripción de un convenio interadministrativo entre*

el Instituto Alexander von Humboldt y el Fondo de Adaptación para aunar esfuerzos para la delimitación de los ecosistemas estratégicos priorizados (páramos y humedales). Convenio intersintitucional, Bogotá, D.C.

- García, H. (2013). *Valoración de los servicios ecosistémicos del Páramo de Santurbán*. Documento de trabajo de Fedesarrollo - Financiado con recursos de USAID.
- García, J. (2003). *Análisis del potencial de emisión de dióxido de carbono del Páramo de Chingaza y lineamientos para su conservación en el contexto del mecanismo de desarrollo limpio*. Trabajo de grado. Facultad de estudios ambientales y rurales - Pontificia Universidad Javeriana, 38-45.
- Girma, H. M., Hassan, R. M., & Hertzler, G. (2012). Forest conservation versus conversion under uncertain market and environmental forest benefits in Ethiopia: The case of Sheka forest. *Forest Policy and Economics*, 21, 101-107.
- Golder Associates (2012). *Technical Report: Updated Preliminary Economic Assessment on the Angostura Gold-Silver Underground Project*. Lima: Golder Associates.
- Guerrero, E. (2009). *Implicaciones de la minería en los páramos de Colombia, Ecuador y Perú*.
- Gutierrez, Á., & Díaz Granados, M. (Mayo de 2007). Valoración de impactos y evaluación económica en rehabilitación de cuencas. Caso cuenca río Tona. *Avances en recursos hidráulicos* (15), 3-10.
- Hecken, G. V., Bastiaensen, J., & Huybrechs, F. (2012). Towards an Institutional Approach of Payments for Environmental Services: Supply and Demand Perspectives from two Case Studies in the Nicaraguan Agricultural Frontier. En L. R. Roldan Muradian, *Governing the Provision of Ecosystem Services* (Vol. 4, págs. 357-375).
- Helliwell, D. (1969). The valuation of wildlife resources. *Regional Studies*, 3, 41-47.
- Hofstede, R. (2003). Los páramos en el mundo: Su diversidad y sus habitantes. En R. Hofstede, P. Segarra, & P. Mena, *Proyecto atlas mundial de los Páramos: Los páramos del mundo*. Quito, Ecuador: EcoCiencia.
- Hyndman, R., & Khandakar, Y. (2008). Automatic Time Series Forecasting: The forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, 27(3).
- IAvH (2011). *Concepto técnico pertinente a la delimitación y caracterización del sistema paramuno en el área de la serranía de Santurbán ubicada en el departamento de santander, solicitado por la Dirección de licencias del MADs*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- IAvH (2013a). *Nueva cartografía de los Páramos de Colombia: diversidad, territorio e historia*. Recuperado el 5 de Agosto de 2013, de Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt : <http://www.humboldt.org.co/iavh/component/k2/item/1189-nueva-cartograf%C3%ADa-de-los-p%C3%A1ramos-de-colombia-diversidad-territorio-e-historia>
- IAvH (2013b). *Resumen Ejecutivo: Aportes a la identificación de los límites inferiores del ecosistema de páramo a esc. 1:25.000 y análisis de su contexto socioeconómico. Complejo de Páramos Jurisdicciones-Santrubán-Berlín*. Bogotá, D.C.: Documento de trabajo. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt .
- Icaza, P. Á., & Piña, C. M. (2008). Evolución y perspectivas de las políticas ambientales y sus instrumentos que favorecen la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad. En *Capital natural de México, vol. III: Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad*. Conabio.

- IDEAM (2006). *Zonificación hidrográfica de Colombia*. Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales.
- IDEAM (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá, D.C., Colombia: Miniestario de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IPCC (2013). *Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Summary for policy makers*. Estocolmo, Suecia: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kapelle, M., & Horn, S. P. (2005). *Páramos de Costa Rica*. Santo Domingo: Editorial INBio.
- MADR (2012). *Anuario estadístico del sector agropecuario*. Bogotá, D.C.: Ministerio de agricultura y desarrollo rural.
- Madriñán, S., Cortés, A. J., & Richardson, J. E. (2013). Páramo is the world fastest evolving and cooling biodiversity hotspot. *Frontiers in Genetics*, 4(492).
- MADS (2002). *Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de Alta Montaña*. Bogotá, D.C., Colombia: Ministerio del Medio Ambiente de Colombia.
- MADS, & SPNN (2012). *Comportamiento de visitantes a áreas protegidas nacionales con vocación ecoturística*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Sistema de Parques Nacionales Naturales.
- Maldonado, J. (2008). *Economía de los recursos naturales*. Bogotá, D.C.: Facultad de Economía, Universidad de los Andes. Centro de Estudios sobre Desarrollo Económico - Cede. Ediciones Uniandes.
- Mann, M., Kaufmann, R., Bauer, D. M., Gopal, S., Baldwin, J., & Vera-Díaz, M. D. (2012). Ecosystem Service Value and Agricultural Conversion in the Amazon: Implications for Policy Intervention. *Environ Resource Econ* (53), 279-295.
- Martínez, A. (2013). *Estudio sobre los impactos económicos del sector minero en Colombia: encadenamientos sectoriales*. Bogotá, D.C.: Fedesarrollo.
- Mason, C. (2011). On stockpiling natural resources. *Resource and Energy Economics*, 33, 398-409.
- MAVDT (2010). *Política nacional para gestión integral del recurso hídrico*. Bogotá, D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington D.C.: United Nations Environment Programme UNEP.
- Morales M., Otero J., Van der Hammen T., et al. (2007). *Atlas de Páramos de Colombia*. Bogotá, D.C.: Intituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Naidoo, R., & Ricketts, T. H. (2006). Mapping the Economic Costs and Benefits of Conservation. *PLoS Biology*, 4(11).
- Nordhaus, W. (2008). *A question of Balance. Wheighting the options of Global Warming Policies*. New Haven and London: Yale University Press.
- OECD (2014). *Colombia Environmental Performance Review*. Organización .
- Olschewski, R., & Benítez, P. (2010). Optimizing joint production of timber and carbon sequestration of afforestation projects. *Journal of Forest Economics* (16), 1-10.

- Ordúz, N., & Uprimny, R. (2008). *El principio de precacución y la Amazonía*. Bogotá, D.C.: Cepal; Patrimonio Natural.
- Ospina, D. R., & Rodríguez, C. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de los páramos en Colombia*. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Palmer, M. A., Bernhardt, E. S., Schlesinger, W. H., Eshleman, K. N., Foufoula-Georgiou, E., Hendryx, M. S., y otros. (2008). Mountaintop Mining Consequences. *Science*, 327(5962), 148-149.
- Pearce, D., Turner, R. K., & Bateman, I. (1990). *Environmental Economics: An elementary introduction*. Baltimore: The John Hopkins University Press.
- Perfetti, J. J. (2012). *Costos de producción de 12 productos agropecuarios*. Bogotá, D.C.: Fedesarrollo - IQartil.
- Pindyck, R. (Diciembre de 2006). Uncertainty in environmental economics. *NBER Working paper series* (12752).
- Podoweski, J., & Poulenard, P. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Paramo: Effect of tillage and burning. *Catena*, 45, 185 - 207.
- Rodríguez, M., Andrade, G., & Wills, E. (2012). Dilemas Ambientales de la Gran Minería en Colombia. *Revista Javeriana*, 17-23.
- Sáenz, L. L., & Mulligan, M. (2007). *Análisis científico detallado del impacto del cambio del uso del suelo en el suministro de recursos hídricos para la ciudad de Bogotá e implicaciones para el desarrollo de esquemas PES*. London: Department of Geography, King's College London.
- Sanclemente, X. (2011). En D. Rivera, & C. Rodríguez, *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Instituto de Investigación de los recursos naturales Alexander von Humboldt.
- Sanclemente, X. (2011). En D. Rivera, & C. Rodríguez, *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos en Colombia*. Bogotá: MADS y IAvH.
- Sarmiento, C., Ramirez, D., Zapata, J., Medina, J., Cadena, C., & Sarmiento, M. (2012). *Actualización del Atlas de Páramos de Colombia*. Convenio interadministrativo de Asociación 11-103, Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá D.C. : Geotadabase esc. 1:100.000.
- Sarmiento, L., Lambí, L., & Marquez, A. E. (2003). Vegetations patterns, regeneration rates and divergence in an old-field succession of the high tropical Andes. (K. A. Publishers, Ed.) *Plant Ecology*, 166, 63-74.
- SIMCO (2013). *Estadísticas de producción de minerales*. Recuperado el 21 de noviembre de 2013, de Sistema de información minero colombiano: <http://www.simco.gov.co/simco/Estad%C3%ADsticas/Producci%C3%B3n/tabid/121/Default.aspx>
- Soto, J. P. (22 de marzo de 2011). Minería, papas y páramos. *El Espectador*.
- SPNN (2013). *Páramos*. Recuperado el 11 de Septiembre de 2013, de Parques Nacionales Naturales de Colombia: <http://www.parquesnacionales.gov.co/PNN/portel/libreria/php/decide.php?patron=01.201214>
- Stern, N. (2007). *The economics of climate change*. Cambridge University Press.

- Stiglitz, J. (2000). *Economics of the public sector*. W W Norton & Company Incorporated.
- SUI (2013). *Acueducto: consulta de información. Consumos Facturados*. Recuperado el 1 de Octubre de 2013, de Sistema Único de Información de Servicios Públicos SIO: <http://www.sui.gov.co/SUIWeb/logon.jsp>
- UPME (2013). *Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO) - Indicadores*. Recuperado el 12 de Junio de 2013, de Unidad de Planeación Minero Energética: http://www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consulta_Indicador.aspx?idModulo=4
- Weitzman, M. (2001). Gamma discounting. *American Economic Review*, 91(1), 261-271.
- Zhuang, J., Liang, Z., Lin, T., & Guzman, F. D. (2007). Theory and Practice in the Choice of Social Discount Rate for Cost-Benefit Analysis: A survey. *Asian Development Bank EDR Working Paper* (94).

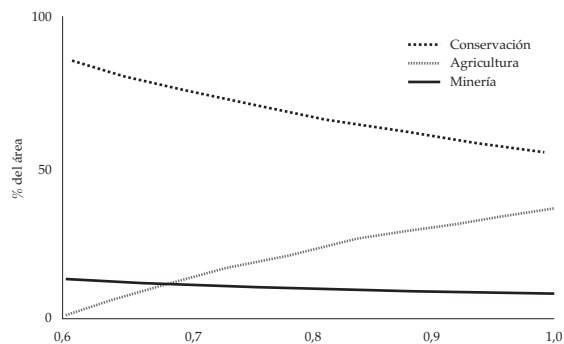
Anexo 1
SELECCIÓN DEL MODELO ARIMA

<i>auto.arima(Agua)</i> <i>Series: Agua</i> <i>ARIMA(2,1,3) (1,0,0) [12]</i>					
	ar1	ar2	ma1	ma2	sar1
Coefficientes	-0,8062	-0,4001	0,703	-0,03324	-0,003
s.e.	0,1966	0,1322	0,1348	0,1243	0,1007
sigma^2 restricted as 2,22e + 0,9: log likelihood = -1.486,5					
AIC = 2.987					
AICc = 2.987					
BIC = 3.006,62					

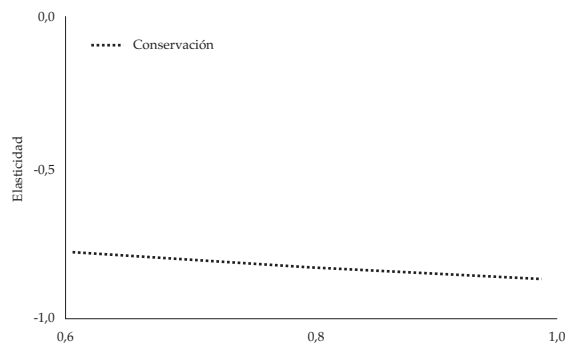
Anexo 2

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE CAMBIOS EN PARÁMETROS RELEVANTES

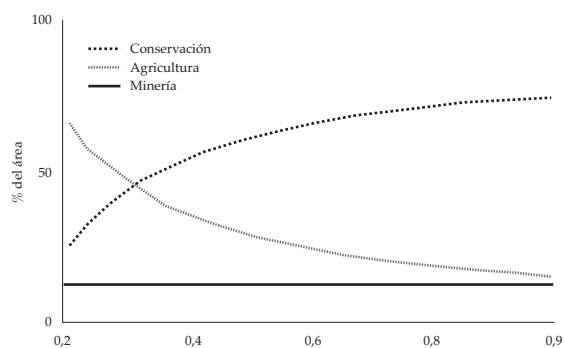
Uso óptimo del suelo

A. Precio papa
(COP/ton)

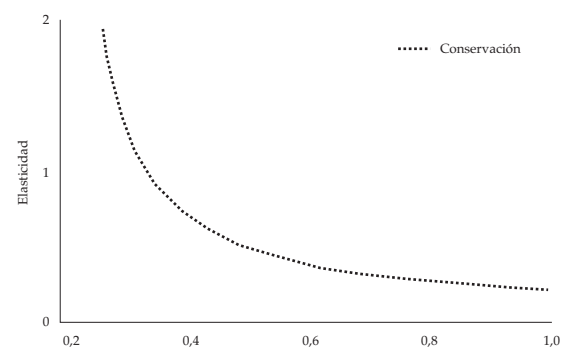
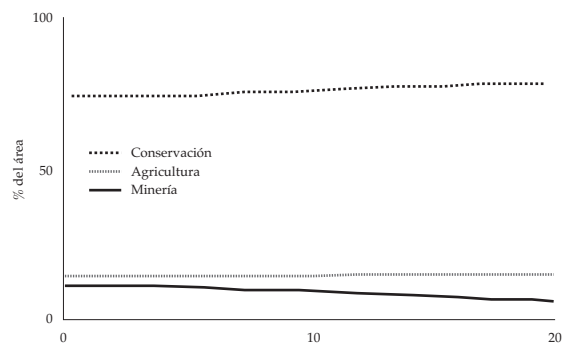
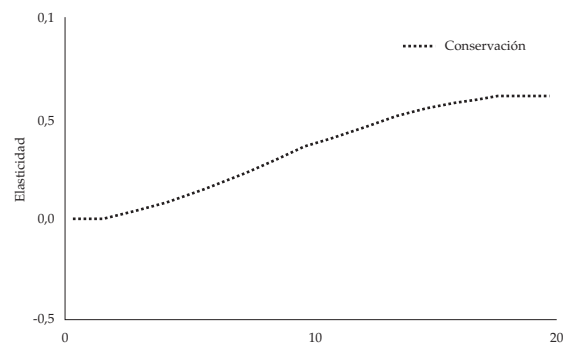
Elasticidad área conservada

D. Precio papa
(COP/ton)

B. Fracción pérdida SE por agricultura



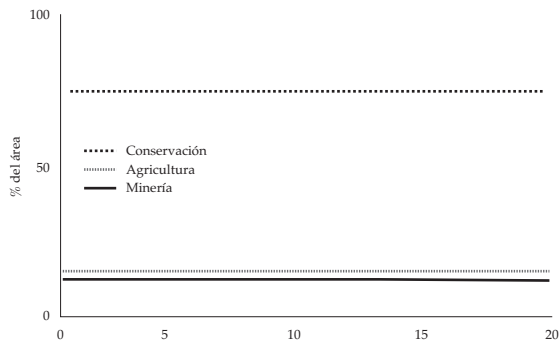
E. Fracción pérdida SE por agricultura

C. Externalidad: ratio
(Km)F. Externalidad: ratio
(Km)

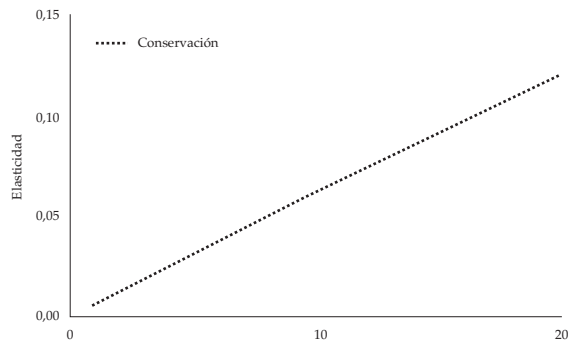
Anexo 2

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE CAMBIOS EN PARÁMETROS RELEVANTES

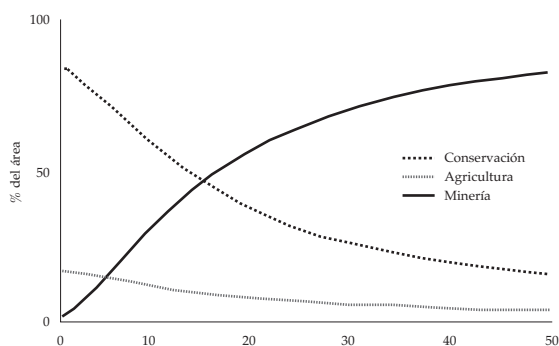
Uso óptimo del suelo

G. Precio del carbono
(USD\$/Tn)

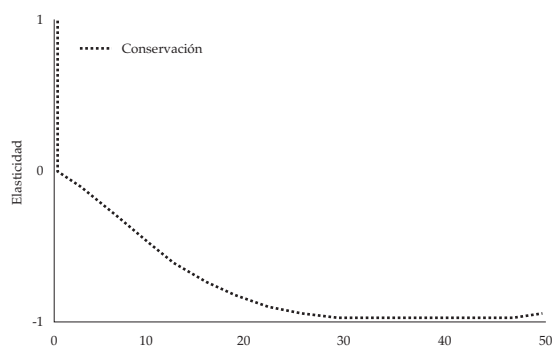
Elasticidad área conservada

J. Precio del carbono
(USD\$/Tn)

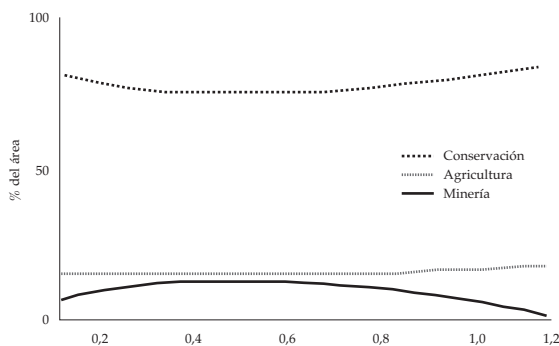
H. Porcentaje área recursos mineros viables



K. Porcentaje área recursos mineros viables



I. Tasa de descuento



L. Tasa de descuento

