

Determinación de los factores de vulnerabilidad en lagunas de alta montaña: una aproximación

Mónica Patricia Valencia-Rojas*, Apolinar Figueroa-Casas

Grupo de Estudios Ambientales (GEA), Departamento de Biología Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Resumen

Los procesos de transformación del territorio están dañando importantes sistemas de laguna en la alta montaña en Colombia. Su alteración continua se atribuye principalmente a causas antropogénicas, y afecta los bienes y servicios que proveen, así como la economía de amplios sectores productivos y naturales. El objetivo de este documento es determinar los factores de vulnerabilidad en una laguna de páramo en el departamento del Cauca con base en una propuesta metodológica que integra tres momentos: i) definición del alcance, ii) un modelo conceptual basado en una red causal integrada por los siguientes elementos: 'direccionado'-presión-estado-impacto-respuesta (DPEIR), y iii) análisis y validación de los factores de vulnerabilidad a la luz de información primaria y secundaria. Los resultados revelaron una compleja relación entre diez factores de vulnerabilidad en procesos biofísicos y sociales, entre los cuales se encuentran la precipitación, la temperatura, el área de litigio entre actores, los rituales y las especies de interés cultural, entre otros. El reconocimiento de los factores de vulnerabilidad a partir de la metodología propuesta en este documento da un punto de partida para la generación de indicadores de análisis sistémico y de abajo hacia arriba (*bottom-up*) de la vulnerabilidad. Asimismo, se dan indicios de los principales direccionadores de cambio que deben ser atendidos de manera prioritaria por los diferentes actores sociales con la intención de reducir tanto la vulnerabilidad como el riesgo frente a la pérdida de los servicios ambientales de la laguna paramuna estudiada en el Parque Nacional Natural Puracé.

Palabras clave: Complejidad; Dimensiones; Direccionadores; Páramo, Puracé.

An approach to identifying vulnerability factors in high mountain lagoons

Abstract

Territorial transformation processes are affecting important lagoon systems in the high mountains in Colombia. Their continuous alteration is attributed to anthropogenic causes mainly, and it affects the goods and services they provide, as well as the economy of large productive and natural sectors. The objective of this document was to identify vulnerability factors or drivers in a *páramo* lagoon in the department of Cauca using a methodological approach which integrates three moments: i) definition of the scope; ii) a conceptual model based on a causal network composed of the following factors: Direction-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR), and iii) the identification of factors using primary and secondary information. The results revealed a complex relationship among ten factors of vulnerability in biophysical and social processes, among them, precipitation, temperature, areas under litigation among actors, rituals, and species of cultural interest, among others. The detection of vulnerability factors based on this methodology provides a starting point to establish indicators for a systemic and bottom-up analysis of vulnerability. Additionally, we give indications on the main drivers of change that must be addressed by the different social actors to reduce the vulnerability and the risk of losing environmental services of the *páramo* lagoon in the Puracé Natural National Park under study.

Key words: Complexity; Dimensions; Drivers; *Páramo*; Puracé.

Introducción

Los humedales altoandinos o de alta montaña son de gran importancia biológica a nivel global; sin embargo, dada su fragilidad están en riesgo frente a diversas amenazas, especialmente frente a las presiones del desarrollo basado en prácticas no sostenibles y el cambio climático (Ramsar, 2005). En Colombia su deterioro se ha agudizado debido a la ocupación y el uso de los páramos y los piedemontes

cordilleranos andinos desde el siglo antepasado. Desde entonces, la influencia antrópica en ellos ha venido en aumento (Morales, *et al.*, 2007). En numerosas regiones paramunas colombianas se adelantan labores productivas contrarias a la verdadera vocación del uso del suelo

*Correspondencia:

Mónica Patricia Valencia Rojas, mvalenciarojas@unicauca.edu.co

Recibido: 16 de julio de 2017

Aceptado: 26 de diciembre de 2017

dictada por sus características físicas y bióticas. Entre tales actividades cabe mencionar las concesiones mineras (oro, carbón), los cultivos forestales (pino, eucalipto), la agricultura intensiva, la introducción de especies, la ganadería, la extracción intensiva de leña y materiales (bambúes, paja, juncos), y el turismo masivo, entre otras (Vargas & Rivera, 1990; Hofstede, 2003; Buytaert, *et al.*, 2006; Reiss, 2006; Garavito, 2016).

Dichas intervenciones se hacen evidentes incluso en parques nacionales naturales como Chingaza, Los Nevados y Puracé (Verweij & Budde, 1992; Hofstede, 1995; Premauer, 1999; Vargas, *et al.*, 2002; UASPNN, 2004; Joaqui, *et al.*, 2009; Martínez, *et al.*, 2009; Muñoz, *et al.*, 2009), entre otros. A su vez, estos procesos de transformación han impactado los ecosistemas de humedales de alta montaña, especialmente aquellos ubicados en el macizo colombiano, que es despensa de bienes y servicios, pues un alto porcentaje del agua requerida por la nación proviene de ellos.

La vulnerabilidad se entiende como el estado de susceptibilidad al daño por exposición a tensiones asociadas con cambios ambientales y sociales, y la falta de capacidad de adaptación (Adger, 2006). Su estudio se aborda a partir un enfoque integral, sistémico y multidimensional como el de los sistemas socio-ecológicos (Berkes & Folke, 1998; Walker, *et al.*, 2002; Valencia & Figueroa, 2015). Este enfoque permite reconocer la complejidad ambiental del sistema, pues incorpora los componentes más importantes o más indicativos, como son los aspectos sociales (cosmovisión, patrones culturales, saberes), los aspectos económicos (productividad, ingresos), la legislación (política de humedales interiores, cabildo indígena), la dinámica natural (sucesión natural, variabilidad climática), los elementos sociales (actividades antrópicas) y la ecofisiología (características propias del humedal), entre otras.

En este contexto, el análisis de la vulnerabilidad de las lagunas de páramo frente a los procesos antrópicos plantea el reto de determinar, en primer lugar, los factores de vulnerabilidad (direccionadores de cambio y presiones), lo cual debe hacerse no solo desde la perspectiva convencional del cambio climático, sino a partir de la detección de los factores que den respuesta a la presión que ejercen las actividades antrópicas en un territorio y en el marco de las condiciones cambiantes propias de la variabilidad climática, así como de los patrones culturales. Dichos elementos se deben explorar e incorporar al análisis mediante un enfoque integral e interdisciplinario que aborde los sistemas de laguna como sistemas socio-ecológicos y que, a su vez, tenga presente los direccionadores del cambio, la presión, el estado, el impacto y las respuestas en el sistema. En este orden de ideas, la pregunta que se abordó fue, ¿cuáles son los factores que generan vulnerabilidad en la laguna de San Rafael en el Parque Nacional Natural Puracé?

El estudio del funcionamiento de los ecosistemas acuáticos altoandinos (por encima de los 2.500 msnm) y de sus problemáticas desde una visión cada vez más holística

e interdisciplinaria va en aumento. Entre los trabajos de referencia en la literatura especializada se destacan las evaluaciones del estado trófico (Álvarez, 2005; Vásquez, *et al.*, 2006) y de la intervención antrópica (Plaza, *et al.*, 2017), así como las mediciones de los cambios espacio-temporales (Bejarano & Bonilla, 2009; Muñoz, *et al.*, 2009), entre otros. Sobre el tema de la vulnerabilidad, se ha avanzado en el estudio del comportamiento de los recursos hídricos frente al cambio climático, y en cuanto a las lagunas de alta montaña, está el estudio del complejo de humedales de las lagunas de Fúquene, Cucunubá y Palacio en la cordillera Oriental colombiana (Franco, *et al.*, 2011), y del comportamiento de una laguna en el páramo de Puracé, en la cordillera Central, frente a la complejidad ambiental (Valencia, 2014).

En los últimos 20 años el modelo direccionador-presión-estado-impacto-respuesta (DPEIR) viene aplicándose en diferentes campos y contextos como un marco inicial. Dicho modelo ha sufrido modificaciones y desarrollos en un proceso de evolución convergente en el que sus categorías iniciales han variado según el área del conocimiento o los elementos de interés. Así, se ha cambiado la categoría de impacto (I) por la de servicios ecosistémicos (E) o de bienestar (B), y la de estado (E) por la de vulnerabilidad (V), entre otras (Patrício, *et al.*, 2016). En su aplicación al estudio de ecosistemas acuáticos se destaca la construcción de modelos conceptuales para ecosistemas marinos que incorporan sus servicios ecosistémicos (Kelble, *et al.*, 2013); un modelo conceptual para la estimación del índice de seguridad ecológica (sostenibilidad del ecosistema) en un lago en China (Wang, *et al.*, 2015); un modelo conceptual y explicativo de la dinámica de un sistema lótico (Pirvu & Petrovici, 2013); una guía para la determinación de los direccionadores abordados únicamente como necesidades sociales básicas y de indicadores de presión, estado y respuesta a partir de la conceptualización y la comprensión de la dinámica de un sistema ecológico complejo (Pletterbauer, *et al.*, 2017); asimismo, se ha transformado en una herramienta para determinar y diseñar técnicas de monitorización de proyectos de restauración riparia (Song & Frostell, 2012), entre otra decena de estudios en sistemas acuáticos que han empleado el modelo como lente analítica (Vollmer, *et al.*, 2016).

Especialmente en torno a la determinación de factores o direccionadores de vulnerabilidad en sistemas acuáticos, existe el antecedente internacional del estudio de Van Asselen, *et al.* (2013), quienes mediante un metaanálisis de regresión establecieron los factores de cambio en 105 humedales, y elaboraron un listado de 29 factores de vulnerabilidad para estos sistemas de la región templada. En Colombia, Franco, *et al.* (2013) establecieron los factores de vulnerabilidad a partir del desarrollo de un modelo ecológico conceptual de funcionamiento de los humedales altoandinos frente a los procesos que determinan su funcionalidad y los elementos estructurales que los sustentan, y obtuvieron

factores asociados a procesos biofísicos y socio-ecológicos. Por su parte, a partir de una revisión bibliográfica hecha a través de matrices de impactos cruzados y multiplicación aplicada a una clasificación (MIC MAC), **Senhadji, et al.** (2017), diferenciaron factores, problemáticas e impactos en 19 humedales y encontraron que los aspectos asociados a procesos urbanísticos, de disposición de desechos y agrícolas fueron los de mayor impacto.

El presente estudio tuvo como propósito presentar los factores de vulnerabilidad de una laguna de páramo establecidos a partir de una aproximación metodológica que considera tres momentos: i) definición del alcance y la selección del enfoque para la vulnerabilidad; ii) descripción de la dinámica del sistema de laguna a partir de un modelo conceptual basado en una red causal integrada por los siguientes aspectos: direccionador-presión-estado-impacto-respuesta (DPEIR), y iii) el análisis y la validación de los factores de vulnerabilidad a la luz de información primaria y secundaria para la zona de interés.

Dichos factores son el primer peldaño para avanzar en la construcción de los indicadores de un análisis de vulnerabilidad. Con ello se aspira a responder a la necesidad de conocer y entender el estado ecológico y la integridad de los humedales como un medio para documentar el alcance de la

degradación, advertir sobre su estrés y valorar su deterioro. Esta información es pertinente en Colombia para determinar la eficacia de las medidas de gestión y hacer un seguimiento a la condición de los humedales en el marco de programas de gestión, restauración y mitigación.

Materiales y métodos

Área de estudio. La laguna de San Rafael o Andulvio, que significa ninfa de las aguas en la lengua de la comunidad indígena del sector, se ubica en el nororiente del Parque Nacional Natural Puracé (PNNP), en el municipio de Puracé, departamento del Cauca, Colombia (Figura 1). Se encuentra en un pequeño valle aluvial localizado a 3.300 msnm ($1^{\circ} 50' - 2^{\circ} 24' N$ y $76^{\circ} 37' - 76^{\circ} 42' O$), con asociaciones vegetales propias del páramo, como frailejonales, pajonales y chuscales, que dominan en sus alrededores; sobre las pendientes de las colinas circundantes se encuentran parches de bosque y arbustos (**Martínez, et al.**, 2009).

Esta zona hace parte de la reserva de la biosfera Cinturón Andino correspondiente a dicho parque nacional por su significación ecológica y cultural, y alberga importantes áreas de sistemas naturales poco intervenidos. Sin embargo, en las últimas décadas el sector de San Rafael ha sufrido reducciones significativas en el área ocupada por coberturas

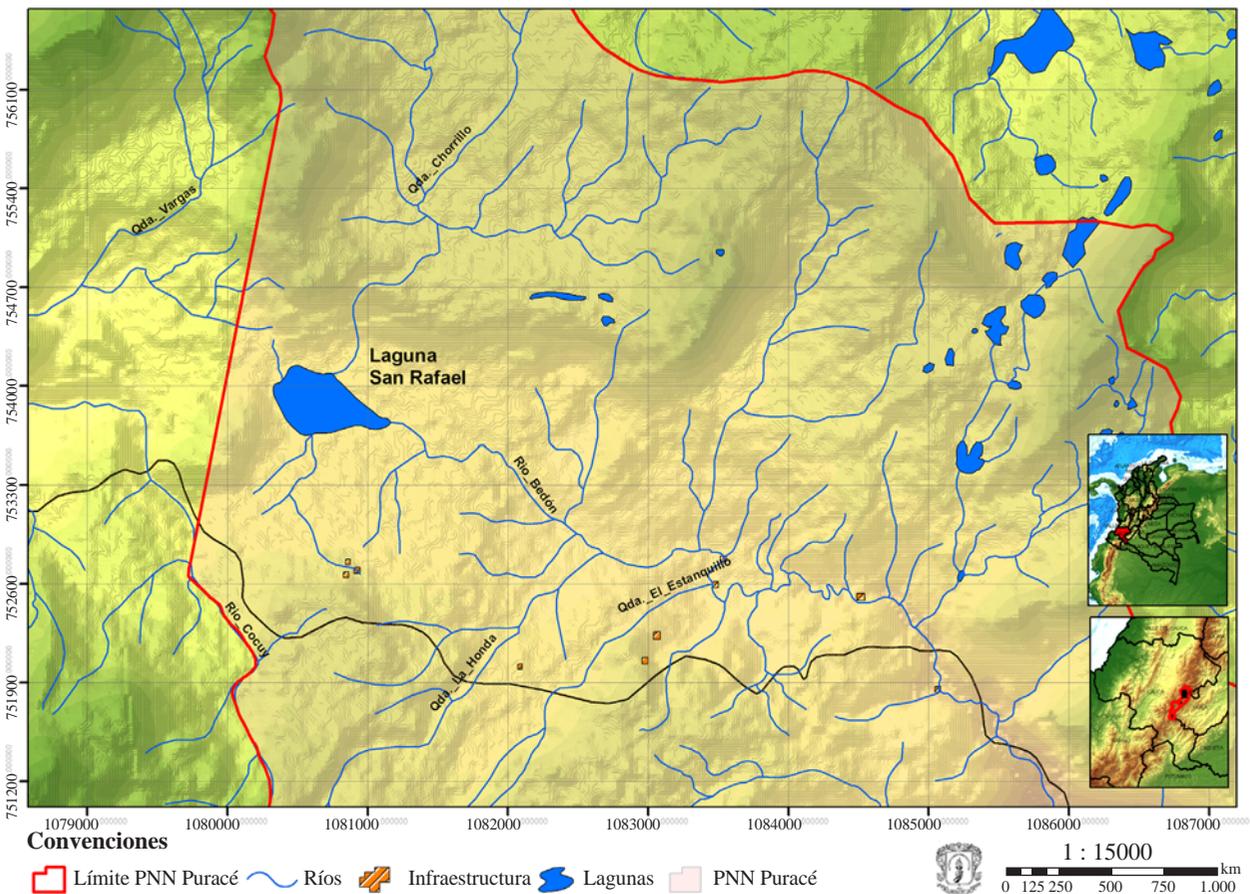


Figura 1. Laguna de San Rafael, Parque Nacional Puracé. Fuente: Valencia, 2014

vegetales naturales de bosques, páramos y humedales como resultado de actividades antrópicas tales como la quema, la ganadería, la actividad agrícola, la extracción de madera y las actividades turísticas descontroladas (Duque & Restrepo, 1992; Tandioy, 2008; Joaqui, *et al.*, 2009; Martínez, *et al.*, 2009; Mosquera, 2009; Muñoz, *et al.*, 2009; Ruiz, 2009).

En la zona confluyen diversos actores sociales como el Cabildo Indígena de Puracé, la administración del Parque Nacional Natural Puracé, la alcaldía de Puracé, la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) y la Corporación del Alto Magdalena (CAM), entre otros. Sus pobladores son mayoritariamente los indígenas de la etnia Kokonuco, representados por el cabildo mencionado, cuyas actividades económicas son la ganadería, la minería (azufre y canteras) y los cultivos de papa, fresa y mora. Además, los cabildantes tienen una estrecha relación cultural con la laguna a través de sus rituales y como espacio de espíritus protectores de la naturaleza.

Tipo de estudio. Se hizo un estudio de tipo descriptivo con el cual se diagnosticó la situación de la laguna, explicando las razones de la situación actual y su origen; por último, se hizo una propuesta de metodología para la determinación de los factores de vulnerabilidad en los siguientes tres momentos.

Delimitación del alcance. El alcance se delimitó a partir de cuatro preguntas orientadoras empleadas en el análisis de vulnerabilidad desarrollado por Malone & Engle, (2011): i) ¿Qué o quién es vulnerable?; ii) ¿Qué es la vulnerabilidad?; iii) ¿Vulnerable a qué?, y iv) ¿Cuál es el atributo a medir? La selección del enfoque se basó en los planteamientos de Adger (2006) y Valencia & Figueroa (2015).

Descripción de la dinámica del sistema de laguna a partir de un modelo conceptual basado en una red causal integrada por direccionador - presión - estado - impacto - respuesta (DPEIR). Este modelo causal fue desarrollado inicialmente por Rapaport & Friend (1979) y popularizado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 1993); se fundamenta en una evolución secuencial que parte de las fuerzas o direccionadores naturales y antrópicos que gobiernan los sistemas, en los cuales el desarrollo social y económico origina presiones en el medio, que dan lugar a una serie de cambios en el estado del medio ambiente. Como consecuencia de estos cambios hay impactos en la salud, la disponibilidad de recursos, la conservación de los ecosistemas naturales, etc., lo cual da lugar a una serie de respuestas por parte de los agentes sociales y los poderes públicos destinadas a mejorar la gestión económica y social, a eliminar o reducir esas presiones y a restaurar y recuperar el estado del medio y contrarrestar las alteraciones derivadas de los impactos.

El DPEIR fue empleado en este estudio para generar un modelo conceptual a partir de la descripción de los componentes del sistema, las diversas relaciones de sus elementos constituyentes y las sinergias presentes en el ecosistema acuático de interés, con el fin de entender los procesos en

la laguna, así como de dar los primeros indicios sobre los factores de vulnerabilidad asociados a sus direccionadores y a las presiones en categorías temáticas superiores.

Análisis y validación de los factores de vulnerabilidad. Tomando como punto de partida las categorías temáticas establecidas en el modelo conceptual, se propusieron y analizaron posibles métricas o indicadores para cada dimensión del sistema, tal como la biofísica, la institucional, la económica, la sociodemográfica y la cultural.

En la validación se empleó información primaria relacionada con las dinámicas culturales, económicas y naturales, entre otras, la percepción que los actores del Parque Nacional Natural de Puracé (sector San Rafael) han tenido de las lagunas de páramo a través del tiempo, así como las observaciones *in situ*, los conversatorios con grupos focales y la elaboración de la historia ambiental del territorio. Para el diseño y el desarrollo de estas actividades se tuvieron en cuenta métodos tradicionales para la reconstrucción y la reflexión analítica, tales como la historia ambiental (Gallini, 2004), los grupos focales (Morgan, 1996) y la sistematización de experiencias (Jara, 1994; Morgan, 1995). En cuanto a la información secundaria, se buscó bibliografía especializada en bases de datos y se analizaron los referentes más adecuados a la temática y el ámbito de interés. Todo ello permitió abordar y resolver la pregunta de investigación.

Resultados y discusión

Alcance del análisis de la vulnerabilidad del sistema. El alcance estuvo definido inicialmente por las respuestas a las preguntas planteadas: i) ¿Quién o qué es vulnerable? – Respuesta: unidad de análisis (sistema de la laguna); ii) ¿Qué es la vulnerabilidad? – Respuesta: “El estado de susceptibilidad al daño por exposición a tensiones asociadas con cambios ambientales y sociales, y la falta de capacidad de adaptación” (Adger, 2006), y iii) ¿Vulnerable a qué? – Respuesta: a procesos antrópicos (ampliación de la frontera pecuaria, tránsito de personas, trabajo desarticulado de actores sociales, y conflictos por jurisdicciones, entre otros), y biofísicos; y iv) ¿Cuál es el atributo a medir? – Respuesta: la cantidad y la calidad del agua en el sistema de la laguna.

En cuanto al contexto y el alcance del estudio, se seleccionó el paradigma de los sistemas socio-ecológicos para el estudio de la vulnerabilidad, por ser multidimensional y ‘multitensorial’, por permitir el análisis de las relaciones de abajo hacia arriba (*bottom-up*) y por integrar lo social y lo biofísico.

Modelo conceptual basado en una red causal integrada por los elementos de direccionador - presión - estado - impacto - respuesta (DPEIR). A partir del esquema DPEIR se determinaron los elementos e interacciones asociadas a la vulnerabilidad del sistema de la laguna de San Rafael (Figura 2). En primer lugar, la laguna tiene cuatro direccionadores o fuerzas principales de cambio: a) las diferentes percepciones del territorio de sus actores, lo cual

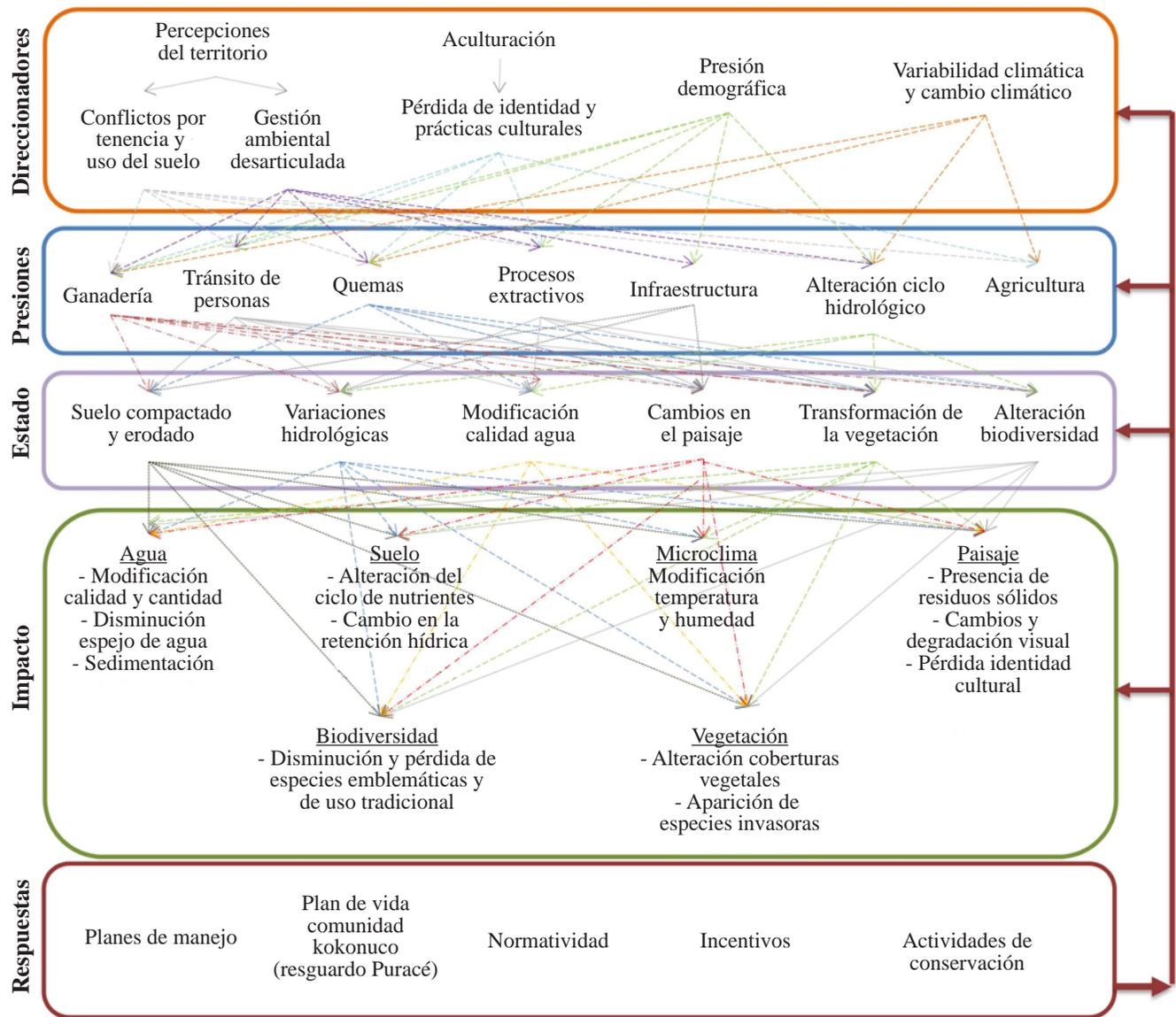


Figura 2. Modelo conceptual del sistema de la laguna de San Rafael. Fuente: elaboración propia

da lugar a conflictos ambientales asociados con la tenencia y el uso de la tierra (la ganadería sobre las zonas de transición se utiliza también como símbolo de posesión de un territorio) entre la comunidad indígena y la administración de Parques Nacionales (Valencia, *et al.*, 2017); se incluye aquí una gestión ambiental del sector San Rafael mediante acciones desarticuladas o yuxtapuestas; b) un proceso de aculturación, en el cual la comunidad indígena no ha sido ajena a las dinámicas que imponen la globalización, permeando su forma de trabajar y vivir; c) la presión demográfica debida a procesos de expansión de tierras y límites de los actores sociales, el crecimiento poblacional y el correspondiente aumento en la demanda de recursos naturales, y d) una variabilidad y cambio climáticos que tienen causas naturales y antrópicas e inciden fuertemente sobre los diferentes elementos biofísicos y sociales del territorio.

Estos direccionadores generan presiones específicas de las actividades humanas tales como: a) la ganadería, con presencia de animales vacunos en la cuenca de la laguna, ya sea como una extensión del área de usufructo de una familia o como indicador de posesión ante otro actor; b) el tránsito de personas debido a la práctica del turismo, la cual constituye una de las actividades económicas importantes en la región, con un número elevado de visitantes diarios (>100 personas), y que se efectúa, por lo general, de manera desarticulada entre los actores; c) las quemas inducidas por el ser humano para el control de la vegetación y la preparación del terreno para las labores agrícolas, a pesar de que el páramo puede presentar fuego natural como parte de su dinámica; d) procesos extractivos de recursos naturales, por ejemplo madera, paja, plantas medicinales, pesca con atarraya y caza de animales silvestres, entre otros, los cuales

han dejado una importante huella en el paisaje debido a su frecuencia en años pasados, y al hecho de que aún ocurren ocasionalmente en el presente; e) la infraestructura asociada a la carretera, que en muchas zonas actúa como línea divisoria de aguas, además de fragmentar el sistema de la laguna al separarla de la cadena volcánica de los Kokonucos; en esta misma categoría se encuentra un camino de acceso a la laguna desde una antigua cabaña de Parques Nacionales; f) la alteración del ciclo hidrológico como consecuencia de la variabilidad y el cambio climáticos, asociados a las prácticas de transformación del territorio, por ejemplo, la canalización o desecación de zonas húmedas y el deterioro de la vegetación que interviene en dicho ciclo, y g) la agricultura, que se realiza en áreas cercanas y podría extenderse en un futuro hacia el sistema de la laguna.

Los diferentes tipos de presión sobre el sistema se evidencian en indicadores de estado como los siguientes: a) un suelo compactado y erosionado que se expresa en el cambio de cobertura vegetal, el deterioro físico y la pérdida de humedad; b) la reducción del espejo de agua, que pasó de tener 24,83 ha en 1965 a 20,73 en 1991 (Muñoz, *et al.*, 2009) y 17,5 en el 2013 (Imbachi, 2014); c) la alteración de la calidad del agua, reflejada en cambios en la producción primaria y la acidez (Donato, 2001; Imbachi, 2014); d) cambios en el paisaje debidos a los procesos de fragmentación de coberturas vegetales (Joaqui, *et al.*, 2009; Martínez, *et al.*, 2009); e) la alteración de la vegetación debida a la ampliación de las coberturas de arbustos, y pajonales-frailejonales, así como la reducción de las coberturas arbóreas y las lagunas (Mosquera, 2009; Muñoz, *et al.*, 2009), y f) la alteración de la biodiversidad, evidenciada en la desaparición de especies de aves, grandes mamíferos y anfibios (Plaza, 2014; Vidal, 2014).

Los direccionadores y las presiones tienen impacto en las funciones y servicios del sistema de la laguna como: a) el agua, con efectos visibles en el aumento de la sedimentación, la disminución del espejo de agua y la alteración de su cantidad y su calidad; b) el suelo, debido a su compactación y degradación por la presencia del ganado vacuno (erosión física), que afecta en parte el ciclo de nutrientes, c) el microclima, por la disminución de la humedad, la presencia de plantas más resistentes al calor (llamadas pastos por los cabildantes, pero pertenecientes a la familia Cyperaceae), y un aumento de la sensación térmica al interior del sistema de la laguna en comparación con años anteriores; d) el paisaje, por la presencia de residuos sólidos y cambios abruptos en la vegetación y en el suelo, aspectos que han llevado a pensar a los cabildantes que la laguna es más mansa, que está en proceso de degradación y que podría dejar de ser un elemento de su identidad; e) la biodiversidad, dado que cada vez es más difícil observar o encontrar rastros de la danta, el oso, el puma y los patos canadienses, entre otras especies; de igual forma, es menos frecuente encontrar plantas medicinales (árnica, apio de monte), y f) la vegetación, con un incremento a través de los años de las especies pioneras y

de sucesión vegetal en los humedales, como por ejemplo los géneros *Carex* y *Holcus* (124 %) y la turbera (62,3 %) (Muñoz, *et al.*, 2009), lo cual refleja, en parte, la intervención humana en el sector.

Las comunidades humanas han dado respuestas mediante diferentes acciones para contrarrestar los procesos antrópicos y naturales en el sistema de la laguna, entre las que se pueden citar: a) los planes de manejo del Parque Puracé, que exhiben unas líneas maestras de acción dictaminadas por los responsables de la oficina de Parque Nacionales; b) el Plan de Vida de los Kokonucos, que le otorga a San Rafael la condición de sitio de interés cultural y espiritual; c) la normatividad nacional, departamental y municipal, así como la de las comunidades del territorio, d) los incentivos del gobierno nacional a través de los programas de familias guardabosques, familias en acción y del adulto mayor, y e) las actividades de conservación conducidas por Parques Nacionales, que catalogan a San Rafael como sitio de conservación especial en el plan de manejo.

Si bien la validez del DPEIR es reconocida, también tiene desventajas como su cobertura y aplicación restringidas, la inconsistencia de los conceptos o sus categorías analíticas en los estudios, la falta de inclusión de realimentación en cada categoría, la ubicación diferencial de los direccionadores, ya sea al principio, en el medio o al final del ciclo, y su escasa utilidad en la valoración y cuantificación de métricas (Oesterwind, *et al.*, 2016; Patrício, *et al.*, 2016; Pletterbauer, *et al.*, 2017). No obstante, es importante reconocer que se ha empleado ampliamente como un modelo conceptual con énfasis en el componente analítico, como un mecanismo de apoyo en la estructura de selección de indicadores, y como una herramienta de explicación para los responsables de decisiones y para usuarios finales. Además, en los últimos años ha venido avanzando en la integración de métricas para valoraciones (Wang, *et al.*, 2015; Pletterbauer, *et al.*, 2017). Para empezar a superar las dificultades mencionadas, se propone delimitar desde el momento inicial la determinación del alcance y los conceptos a trabajar en el marco de una visión de análisis integral (sistémico), considerando los direccionadores como procesos de múltiples escalas, tanto de tipo natural como antrópico, que están al inicio del ciclo y con posibles momentos de realimentación en cada una de sus categorías. Por último, en años recientes los estudios asociados al DPEIR han comenzado a integrar métricas para optimizar su uso en la estimación de variables o indicadores particulares mediante pruebas estadísticas.

La interacción de las fuerzas, las presiones, las condiciones de estado y los impactos, así como las respuestas ante estos factores de estrés, dan cuenta de las causas, las sinergias y la complementariedad existente en el sistema, las cuales pueden, a su vez, organizarse en varias dimensiones temáticas (Figura 3). Al confrontar los elementos resultantes del DPEIR con la información primaria (observación *in situ*, historia ambiental y conversatorios) y la secundaria,

se determinaron y validaron diez factores que favorecen la vulnerabilidad. Estos surgieron al analizar los direccionadores (promotores de cambio) y las presiones sobre la laguna de San Rafael. Los diez factores de vulnerabilidad incluyen aspectos climáticos como la temperatura y la precipitación, los cuales delimitan en gran medida la dinámica climática e hidrológica del sistema de la laguna. Los aspectos socio-demográficos están relacionados con las personas que tiene predios adjudicados en usufructo y que definen la dinámica de uso del suelo en el cabildo indígena, dado que es un territorio colectivo y con delimitación de áreas para uso familiar, y índice de necesidades básicas insatisfechas de 0,51, el cual es más alto que el promedio nacional y revela que la zona todavía tiene muchas necesidades por cubrir. En el tema cultural, la cosmogonía y el simbolismo que le dan las comunidades humanas al sistema se reflejan en la presencia de especies de interés como la palma de chonta, las plantas medicinales, el oso de anteojos y la danta, así

como en los rituales relacionados con el refrescamiento de los bastones de mando y las leyendas asociados con las lagunas del páramo y sus cuidadores, que sirven como estrategia de conservación y protección de un espacio que tiende a ser salvaje, agreste para los visitantes y, por ende, un sistema menos expuesto a la entrada deliberada de personas.

Otros promotores de cambio son las presiones originadas por las fuerzas o direccionadores. En este sentido, el conflicto entre actores sociales por la yuxtaposición de autoridades e instituciones se expresa en un litigio permanente por el territorio, puesto que en 100 % del sector de San Rafael hay solapamiento de actores, y la ampliación de la frontera pecuaria por el pastoreo como actividad económica en esta zona de conservación. También se presentan casos de posesión del territorio de un actor sobre otro mediante las quemaduras para la preparación de terrenos y las actividades de turismo desarticuladas que generan residuos sólidos y una mayor presión sobre el suelo y la vegetación de páramo, con una

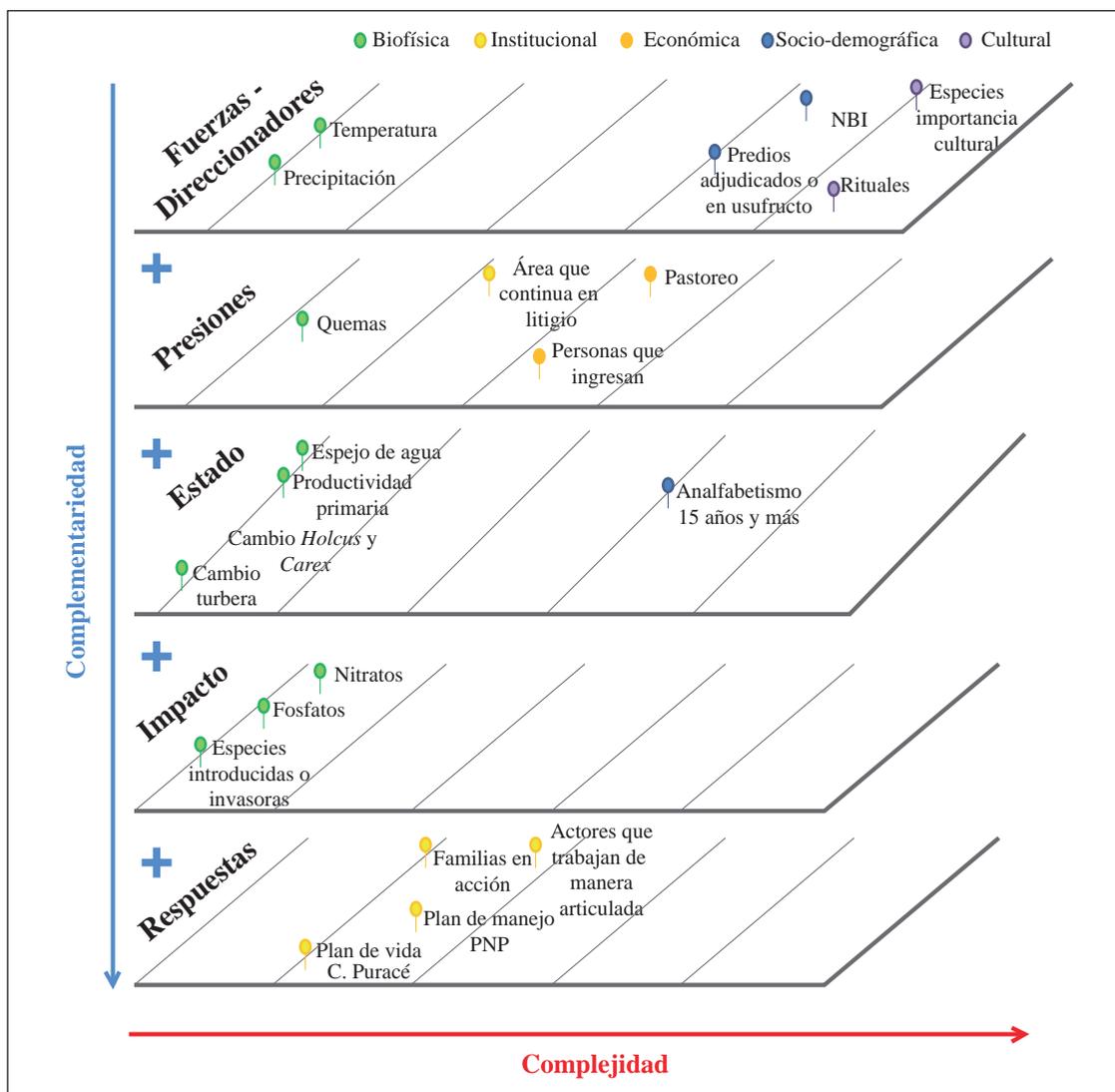


Figura 3. Diagrama conceptual que relaciona los elementos del modelo DPEIR y las dimensiones del sistema. Fuente: elaboración propia

posible superación de la capacidad de carga de la laguna. Estos diez factores establecidos podrían maximizarse si se llegara a presentar un evento climático extremo como el fenómeno de El Niño, el cual tendría un efecto drástico sobre la hidrología y las propiedades fisicoquímicas del agua y, por ende, sobre la biota que habita el sistema. No pueden ignorarse las probables alteraciones en los diferentes servicios ecosistémicos y la afectación del bienestar humano.

La laguna de San Rafael está en un área de conservación nacional, en la que actúan simultáneamente Parques Nacionales y el Cabildo Indígena de Puracé. Este ecosistema carece de afectaciones debidas a actividades agrícolas intensivas, a cambios en las geofformas o modificaciones drásticas en el uso del suelo, como tampoco a dinámicas de urbanización. Por ello los resultados del presente estudio son completamente diferentes a los de la investigación de **Franco, et al.** (2013), quienes trabajaron en un sistema de laguna sometido a un impacto considerable y con una velocidad de cambio diferente. En ese trabajo los factores de cambio se relacionaron con los regímenes hidrológicos y climáticos, la heterogeneidad del paisaje y los procesos sociales y eco-sistémicos que, a través de los sistemas productivos, cambiaron las coberturas vegetales en las cuencas hidrográficas, afectaron el drenaje y fragmentaron el humedal. Los resultados también son distintos a los hallados por **Senhadji, et al.** (2017), quienes encontraron que los factores direccionadores giraron en torno a procesos urbanos (51,7 %), vertimiento de aguas residuales (17,2 %), actividad agrícola (13,7 %) y vertimiento de residuos sólidos (10,3 %) en 29 humedales en diferentes regiones de Colombia.

Las diferencias con dichos estudios radican en que la vulnerabilidad y los factores que la influyen tienden a ser específicos en cada caso. Por lo tanto, la definición del alcance y el conocimiento de las características particulares de cada sistema, así como la manera en que se da la interacción causal, son aspectos indispensables a la hora de evaluar la vulnerabilidad. La certeza solo se tiene sobre aquellos atributos generales relacionados con procesos biofísicos y sociales registrados en la literatura (**Mitsch & Gosselink**, 2000; **Van Asselen, et al.**, 2013), y que denotan un punto de partida para la comprensión de las dinámicas entre diferentes sistemas. A partir de allí debe avanzarse en un mejor conocimiento del funcionamiento del sistema de interés, así como en el análisis detallado y de abajo hacia arriba de sus interacciones a partir de sus particularidades. Por el contrario, si la intención es abordar un sistema con condiciones generales o regiones más amplias, el análisis puede ser de arriba hacia abajo, e involucrar categorías temáticas de escalas medias sin perder de vista las diferentes dimensiones que integran un sistema desde una perspectiva holística.

A partir de los factores determinados en el marco metodológico de este estudio, así como en la adecuada comprensión de la problemática ambiental de la laguna con base en un modelo conceptual analítico de cadena causal, se dio paso a la determinación de los indicadores o métricas para

el análisis de la vulnerabilidad del sistema socio-ecológico de interés. La propuesta metodológica descrita es operativamente práctica y eficiente, tiene una gran capacidad de réplica con ajustes según el contexto, lo que ofrece un enfoque alternativo para determinar dichos factores que, en la medida en que existan datos cuantitativos, puede integrarse para desarrollar análisis más sólidos.

Conclusiones

San Rafael cuenta con un historial de cerca de 50 años de presiones tanto antrópicas como naturales, entre las que se destaca el conflicto territorial generado por sus actores, lo cual afecta de manera especial su dinámica de conservación. Además, cuenta con una condición particular de sensibilidad atribuible al hecho de que se trata de una zona de vida paramuna y tiene la fragilidad de un humedal dadas sus características ecofisiológicas. Estos atributos pueden verse alterados fácilmente por los diez factores de vulnerabilidad establecidos y que se relacionan con procesos biofísicos asociados a la temperatura y la precipitación, y con procesos sociales vinculados al usufructo de la tierra y a la práctica del pastoreo, las quemadas y el tránsito de personas, entre otros. Es importante resaltar que los factores culturales pueden direccionar de manera positiva o negativa la conservación de la laguna y de sus especies de interés mediante los rituales que se llevan a cabo en su entorno y el sentido mítico que acompaña a las lagunas en la alta montaña.

Los factores derivados de la aplicación del modelo conceptual basado en cadenas causales (DPEIR) y su validación con diferentes fuentes de información permitieron integrar las problemáticas ambientales desde su origen y su evolución en términos del estado y los impactos, y con las alternativas de gestión ambiental y territorial en desarrollo. Además de que los factores relacionan los cambios antrópicos y naturales (fuerzas motrices o *driving forces*) responsables de las presiones, constituyen un insumo para la adopción de decisiones por parte de los diferentes actores interesados en adelantar acciones preventivas y correctivas. Su determinación también permite avanzar en la construcción de indicadores para el análisis de la vulnerabilidad de los sistemas de interés.

Esta aproximación a la determinación de los factores de vulnerabilidad con base en la complejidad de un territorio ayudará a entender cómo funcionan las lagunas altoandinas, qué tan vulnerables son a las perturbaciones, y a prever en qué medida y de qué manera se debe actuar para lograr su gestión considerando sus relaciones y no sus componentes, como se ha hecho por décadas. Por último, esta investigación resalta el papel de la comprensión de la vulnerabilidad de los sistemas frente al cambio global como medio para orientar las intervenciones específicas en un territorio. En este sentido, el enfoque utilizado permite encarar el desafío de anticiparse a los cambios futuros a partir de la comprensión de los procesos y fenómenos que dinamizan los procesos sociales y los biofísicos en ecosistemas estratégicos.

Agradecimientos

Este documento forma parte de una tesis doctoral en Ciencias Ambientales, que analiza desde una perspectiva interdisciplinaria la vulnerabilidad de las lagunas de páramo frente a los procesos antrópicos en el Macizo Colombiano, financiada por Colciencias a través del Fondo Francisco José de Caldas. Se da especial reconocimiento al financiador, a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca, al Cabildo Indígena de Puracé y a Parques Nacionales Naturales de Colombia, por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Aporte conjunto a partir del trabajo doctoral de Mónica Patricia Valencia Rojas, con contribuciones de Apolinar Figueroa Casas.

Referencias

- Adger, W.** (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, **16**: 268-281.
- Álvarez, J. P.** (2005). Evaluación del estado trófico del humedal de Jaboque: análisis espacial y temporal de las características físico-químicas del agua y de la comunidad planctónica. Informe final Convenio de cooperación Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá.
- Bejarano, P.A., Bonilla, M.A.** (2009). Dinámica espacio-temporal del humedal Juan Amarillo entre 1950 - 2005. *Acta Biológica Colombiana*, **14**: 87-106.
- Berkes, F. Folke, C.** (1998). Linking social and ecological systems for resilience and sustainability: Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F.** (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, **79**: 53-72.
- Donato, J. C.** (2001). Fitoplancton de los lagos andinos del norte de Sudamérica (Colombia). Bogotá (Colombia): Academia Colombiana de Ciencias Exactas y Naturales (Colección Jorge Álvarez Lleras, N.º 19). p. 232.
- Duque, A. Restrepo, C.** (1992). Tipos de vegetación del llano de Paletará. Cordillera Central Colombia. *Caldasia*, **17**: 21-34.
- Franco, L., Delgado, J., Andrade, G.** (2013). Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global. *Revista Colombiana de Geografía*, **22**: 2256-5442.
- Franco, L., Delgado, J., Andrade, G., Hernández, S., Valderrama, J.** (2011). Humedales altoandinos frente al cambio climático global evaluación de la vulnerabilidad y estrategia de adaptación en un complejo de humedales de la Cordillera Oriental Colombiana: lagunas de Fúquene, Cucunubá y Palacio (p. 430). Bogotá: Informe Final CONVENIO DHS No. 131 DE 2009 ECOPETROL – Fundación Humedales.
- Gallini, S.** (2004). Problemas de métodos en la historia ambiental de América Latina. *Anuario IHES*, **19**: 147-171.
- Garavito, L. N.** (2016). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Ingeniare*, **19**: 127-136.
- Hofstede, R.** (2003). Los páramos en el mundo: su diversidad y sus habitantes. En: Hofstede, R., Mena, P., Segarra, P. (Eds.). *Los páramos del mundo*. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/Eco Ciencia. Quito.
- Hofstede, R.G.M.** (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. *Plant and Soil*, **173**: 111-132.
- Imbachi, D.** (2014). Integridad ecológica de la laguna San Rafael Parque Nacional Natural Puracé, Cauca. Biólogo, Universidad del Cauca, Popayán.
- Jara, O.** (1994). Para sistematizar experiencias: una propuesta teórica y práctica (p. 73-125). San José: IUCN.
- Joaqui, S., Figueroa, A., Ramirez, B.** (2009). Análisis multi-temporal de coberturas vegetales para ecotopos paramunos. Parque Nacional Natural Puracé. In A. Figueroa & M. Valencia (Eds.), *Fragmentación y coberturas vegetales en ecosistemas andinos, departamento del Cauca*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Kelble, C. R., Loomis, D. K., Lovelace, S., Nuttle, W. K., Ortner, P. B., Fletcher, P., Boyer, J.N.** (2013). The EBM-DPSER Conceptual Model: Integrating Ecosystem Services into the DPSIR Framework. *PLoS ONE*, **8** (8): e70766. doi: 10.1371/journal.pone.0070766
- Malone, E.L. Engle, N.L.** (2011). Evaluating regional vulnerability to climate change: purposes and methods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **2**: 462-474. doi: 10.1002/wcc.116
- Martínez, J., Figueroa, A., Ramírez, B.** (2009). Cambios de cobertura y fragmentación a través de un análisis espacio temporal en el Parque Nacional Natural Puracé In A. Figueroa & M. Valencia (Eds.), *Fragmentación y coberturas vegetales en ecosistemas andinos, departamento del Cauca* (p. 400). Popayán: Universidad del Cauca.
- Mitsch, W., Gosselink, J.** (2000). *Wetlands* (3 ed.). Canada.: John Wiley & Sons, Inc.
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Cárdenas, L.** (2007). Atlas de páramos de Colombia. Bogotá, D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Morgan, D. L.** (1996). Focus groups. *Annual Review of Sociology*, **22**: 129-152.
- Morgan, F.** (1995). La sistematización: apuesta por la generación de conocimientos a partir de las experiencias de promoción. Escuela para el Desarrollo. Materiales Didácticos.
- Mosquera, A.** (2009). Caracterización de dos zonas de transición, mediante el análisis de las coberturas vegetales y variables microambientales en una zona de páramo, en el sector nororiental del Parque Nacional Natural Puracé. Biólogo, Universidad del Cauca, Popayán.
- Muñoz, F., Figueroa, A., Vergara, H.** (2009). Análisis espacio temporal de humedales altoandinos: laguna de San Rafael y humedal de Calvache. In A. Figueroa & M. Valencia (Eds.), *Fragmentación y coberturas vegetales en ecosistemas andinos, departamento del Cauca*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Organization for Cooperation and Economic Development.** (1993). OECD indicators for environmental performance reviews. A synthesis report by the Group on the State of the Environment. Paris.

- Oosterwind, D., Rau, A., Zaiko, A.** (2016). Drivers and pressures – Untangling the terms commonly used in marine science and policy. *Journal of Environmental Management*. **181** (Supplement C): 8-15. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.05.058
- Patrício, J., Elliott, M., Mazik, K., Papadopoulou, K.-N., Smith, C. J.** (2016). DPSIR—Two Decades of Trying to Develop a Unifying Framework for Marine Environmental Management? *Frontiers in Marine Science*. **3**: 177.
- Pîrvu, M., Petrovici, M.** (2013). DPSIR conceptual framework role: A case study regarding the threats and conservation measures for caddisflies (Insecta: Trichoptera) in Romania. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. **411**: 11.
- Plaza, V.** (2014). Alteraciones antrópicas en el sistema lagunar San Rafael (Parque Nacional Natural Puracé) a través de tres subdivisiones de hábitat. *Bióloga, Universidad del Cauca, Popayán*.
- Plaza, V., Valencia, M., Figueroa, A.** (2017). Aplicación del índice integrado relativo de antropización (INRA), en un ecosistema de alta montaña. *Luna Azul*. **44**: 80-93.
- Pletterbauer, F., Funk, A., Hein, T., Robinson, L., Culhane, F., Delacamara, G., ...Tamis, J.** (2017). Drivers of change and pressures on aquatic ecosystems: European Union.
- Premauer, M.J.M.** (1999). Efecto de diferentes regímenes de disturbio por quema y pastoreo sobre la estructura horizontal y vertical de la vegetación de páramo (Parque Nacional Natural Chingaza). Trabajo de grado, departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Ramsar.** (2005). Estrategia regional de conservación y uso sostenible de los humedales altoandinos. Ramsar COP9 DOC. 26. Fecha de consulta: 20n de enero de 2017. Disponible en: http://www.ramsar.org/doc/cop9/cop9_doc26_s.doc
- Rapport, D. & Friend, A.** (1979). Towards a comprehensive framework for environmental statistics: A stress-response approach. *Statistics Canada Catalogue*. 11-510. Ottawa.
- Reiss, K. C.** (2006). Florida Wetland Condition Index for depression forested wetlands. *Ecological Indicators*. **6** (2): 337-352. doi: 10.1016/j.ecolind.2005.03.013
- Ruiz, D.** (2009). Determinación del impacto ambiental sobre el recurso hídrico para consumo humano generado por el establecimiento de actividades antrópicas en la parte alta de la subcuenca del río San Francisco, municipio Puracé, Departamento del Cauca. *Bióloga, Universidad del Cauca, Popayán*.
- Senhadji, K., Ruiz, M., Rodríguez, J.** (2017). Estado ecológico de algunos humedales colombianos en los últimos 15 años: una evaluación prospectiva. *Colombia Forestal*. **20** (2): 181-191.
- Song, X. & Frostell, B.** (2012). The DPSIR Framework and a Pressure-Oriented Water Quality Monitoring Approach to Ecological River Restoration. *Water*. **4** (3): 670.
- Tandioy, W.** (2008). Análisis comparativo de los patrones de cambio naturales y antrópicos en un ecosistema altoandino, en la parte alta de la cuenca río Palacé. *Biologo, Universidad del Cauca, Popayán*.
- Unidad Especial Administrativa de Parques Nacionales Naturales.** (2004). Plan de Manejo Parque Nacional Natural Puracé. Informe técnico. Unidad Especial Administrativa de Parques Nacionales Naturales, Territorial SurAndina (UASPNN). Fecha de consulta: 20 de enero de 2014. Disponible en: <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2013/12/ParquePurace.pdf>
- Valencia, M.** (2014). Vulnerabilidad de las lagunas de páramo a procesos degradativos de origen antrópico incorporando la complejidad ambiental del territorio (Departamento del Cauca, Colombia). Tesis de Doctorado. Popayán (Colombia): Doctorado Interinstitucional en Ciencias Ambientales, Universidad del Cauca. p. 303.
- Valencia, M. & Figueroa, A.** (2015). Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. **14** (26): 29-42.
- Valencia, M., Martínez, J., Joaqui, S., Figueroa, A.** (2017). Historia de las transformaciones en ecosistemas paramunos: el caso del área de traslape del Parque Nacional Natural de Puracé. In A. Perafán Cabrera (Ed.), *Conflictos ambientales en ecosistemas estratégicos. América Latina y el Caribe. Siglos XIX-XXI* (p. 316). Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Van Asselen, S., Verburg, P.H., Vermaat, J.E., Janse, J.H.** (2013). Drivers of wetland conversion: A global meta-analysis. *Plos One*. **8** (11): 1-13. doi: 10.1371/journal.pone.0081292
- Vargas, J.O., Rivera, D.** (1991). El páramo, un ecosistema frágil. *Cuadernos de Agroindustria y Economía Rural*. **6**: 144-166.
- Vargas, O., Premauer, J., De los Ángeles, C.** (2002). Efecto del pastoreo sobre la estructura de la vegetación en un páramo húmedo de Colombia. *Ecotrópicos*. **15** (1): 33-50.
- Vásquez, C., Ariza, A., Pinilla, G.** (2006). Descripción del estado trófico de diez humedales del Altiplano Cundiboyacense. *Universitas Scientiarum*. **11**: 61-67.
- Verweij, P. & Budde, P.** (1992). Burning and grazing gradients in páramo vegetation: Initial ordination analyses. *Páramo: An Andean ecosystem under human influence*. Academic Press, London, p. 177-195.
- Vidal, C.** (2014). Relación de procesos de fragmentación ecosistémica con la diversidad de comunidades de aves frugívoras e insectívoras en el sector nor-oriental del Parque Nacional Natural (PNN) Puracé (p. 95). Popayán: Informe Final de Actividades como Joven Investigador de COLCIENCIAS.
- Vollmer, D., Regan, H.M., Andelman, S.J.** (2016). Assessing the sustainability of freshwater systems: A critical review of composite indicators. *Ambio*. **45** (7): 765-780. doi: 10.1007/s13280-016-0792-7
- Walker, B., Carpenter, S., Anderies, J., Abel, N., Cumming, G., Janssen, M., Pritchard, R.** (2002). Resilience management in social-ecological systems: A working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecology*. **6** (1): 14.
- Wang, Z., Zhou, J., Loaiciga, H., Guo, H., Hong, S.** (2015). A DPSIR model for ecological security assessment through indicator screening: A case study at Dianchi Lake in China. *PLoS ONE*. **10** (6): e0131732.