

Evaluación de la vulnerabilidad biofísica de los servicios ecosistémicos ante el cambio climático: una aproximación conceptual y metodológica

Assessing the biophysical vulnerability of ecosystem services to climatic change: a conceptual and methodological approach

María Fernanda Cárdenas^{1,2} y Conrado Tobón³

Fecha de recepción: 25 de noviembre de 2015.

Aceptación: 1 de junio de 2016.

Recibido versión final: 1xxxxxxx

Resumen

La vulnerabilidad al cambio climático ha sido considerada y evaluada desde diferentes perspectivas, de acuerdo con los objetivos del estudio o del autor, de tal manera que existe un sinnúmero de definiciones, de enfoques, de indicadores o variables para evaluarla y por ende una falta de consenso sobre el tema. En las últimas décadas, la mayoría de los trabajos relacionados con el cambio climático han estado enfocados a determinar los principales impactos del cambio climático y a evaluar la vulnerabilidad de la población humana ante amenazas, es decir, vulnerabilidad socioeconómica. En este trabajo se discute la importancia de evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los ecosistemas, y de los bienes y servicios que éstos prestan, a partir de sus aspectos biofísicos, como base fundamental para evaluar la vulnerabilidad de las poblaciones humanas que dependen de esos bienes y servicios ecosistémicos. Por tanto, se propone un modelo conceptual y una ruta metodológica para evaluar un valor ecosistémico particular, y se presenta, a manera

1. Enviar correspondencia a María Fernanda Cárdenas. Dirección: Calle 77AC 75-165 (1601), Medellín. Tel: 5807487. E mail: mfcarden@unal.edu.co

2. PhD (c), Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín. mfcarden@unal.edu.co, Colombiana.

3. PhD, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ciencias Forestales, Medellín. ctobonm@unal.edu.co, Colombiano.

de ejemplo, un caso de estudio en el cual se proponen las variables pertinentes e indicadores a tener en cuenta para la evaluación de la vulnerabilidad hidrológica que tienen los ecosistemas de alta montaña en el trópico ante el cambio climático.

Palabras claves:

Vulnerabilidad, ecosistemas tropicales, cambio climático, variables biofísicas, páramos.

Abstract

The vulnerability to climatic change has been considered and assessed from different perspectives, depending on the objective of the study or the author, so there are a number of definitions and approaches, without consensus about the best indicators to evaluate it. In recent decades, most of the studies related to climate change, have focused on the determination of the impacts of climatic change and the assessment of vulnerability of a population to threats, which is the socio-economic vulnerability. This paper discusses the importance of evaluating the intrinsic vulnerability of ecosystems, and the services they provide, based on biophysical aspects, as the fundamental basis to assess the vulnerability of the population depending on these ecosystem services. Therefore, we propose a conceptual model and a methodology for assessing the biophysical vulnerability of a given ecosystem, to climatic change. We also present, as an example, a case of study, where we define the variables or indicators to be considered to evaluate the intrinsic vulnerability of ecosystems, to assess, in this case, the hydrological vulnerability of tropical high mountain ecosystems to climatic change.

Keywords:

Vulnerability, tropical ecosystems, climatic change; biophysical variables, páramo.

Introducción

El concepto de vulnerabilidad es ampliamente usado en todos los ámbitos y por prácticamente todos los grupos poblacionales (Füssel 2010). Actualmente se asocia de manera importante con los estudios de cambio climático, dado que en los últimos años, tanto científicos, como organismos internacionales e instituciones de estado, han buscado determinar la vulnerabilidad de sus territorios y poblaciones, con el fin de adelantar acciones o políticas de adaptabilidad frente a las posibles transformaciones o cambios negativos que se puedan presentar, especialmente con el cambio del clima global (Arribas et al. 2012;

Beniston et al. 1997; Chen et al. 2011; Martínez et al. 2011; IPCC 1997; Sergey 2006; Watson et al. 2013; Young et al. 2011).

Sin embargo, aún no hay claridad acerca del concepto de la vulnerabilidad, ni de los términos asociados y los métodos para evaluarla. Aunque la gran mayoría de los autores se refieren a las definiciones dadas por el IPCC (IPCC_AR5 2014; IPCC 2001; IPCC 2002), éstas son tan generales que pueden interpretarse o desarrollarse a gusto del usuario. El resultado de ello son las diferencias conceptuales en la manera como se ha abordado el

problema, así como de los alcances e indicadores de vulnerabilidad que se han planteado, sin que ninguno haya sido ampliamente acogido (Brooks 2003; Füssel 2005; Füssel 2010; Klein 2004).

El término vulnerabilidad ha sido tradicionalmente utilizado en estudios territoriales haciendo referencia a factores socioeconómicos, de infraestructura, de organización comunitaria e institucionalidad, que combinados con las amenazas naturales del territorio en que se asientan las poblaciones, dan origen a un riesgo. A pesar que el Quinto Reporte generado por el Grupo de Trabajo II (IPCC_AR5 2014) da una nueva definición de vulnerabilidad; ésta sigue siendo asociada con los conceptos de sensibilidad o susceptibilidad y capacidad de adaptación; pero además incluye conceptos como amenaza, impacto y riesgo, que antes no se consideraban dentro de este tipo de evaluaciones.

En los términos incorporados en el IPCC_AR5 (2014) se encuentran combinadas características biofísicas de los ecosistemas y los bienes y servicios ambientales, con elementos socioeconómicos e infraestructura, entre otros, siendo estos últimos los que han primado en la mayoría de los estudios de vulnerabilidad desarrollados hasta ahora. Es decir, el término de vulnerabilidad ha sido aplicado principalmente a valorar el estado de riesgo o la amenaza de una población ante los efectos del cambio climático. Sin embargo, la vulnerabilidad intrínseca que tienen los ecosistemas solo ha sido parcialmente investigada, a pesar de que cada vez la evidencia de los impactos del cambio climático sobre los sistemas naturales es más fuerte y más completa (IPCC_AR5 2014). En particular, el IPCC AR-5 recogió y cuantificó los efectos registrados como consecuencia del cambio climático sobre recursos como el agua (Jiménez et al. 2014), los sistemas terrestres (Settele et al. 2014), y otros sistemas y recursos naturales y manejados (Oppenheimer et al. 2014), pero lo hace en términos de impactos y de sus proyecciones, más que de vulnerabilidad propiamente dicha. Otra aproximación desde la perspectiva biofísica es la evaluación de la vulnerabilidad de especies, tanto de

flora como de fauna, de acuerdo con el índice propuesto por NatureServe, como una de las respuestas de los investigadores para evaluar la vulnerabilidad, ante las crecientes solicitudes de información por parte de los tomadores de decisiones (Young et al. 2015). Este índice considera elementos de exposición y sensibilidad de las especies estudiadas, con base en sus características como insumo para la comprensión de cómo el cambio climático puede influenciar la biodiversidad de una región en particular (Pacifi et al. 2015).

No obstante, persiste un vacío en la identificación y caracterización de los factores biofísicos que determinan la vulnerabilidad propia del funcionamiento de cada ecosistema frente al cambio climático. Esto permitirá conocer los efectos que dichos impactos pueden generar en los ecosistemas en sí, diferenciando la vulnerabilidad biofísica de la vulnerabilidad socio-económica (Hassan et al. 2005), en la medida que la economía y el bienestar humano están supeditados al mantenimiento de la integridad y la resiliencia de los ecosistemas (Gómez-Baggethun & De Groot 2007).

En este sentido, es primordial conocer las características y propiedades naturales de los ecosistemas que soportan el funcionamiento y el desarrollo social, para establecer hasta qué punto éstos soportan diferentes impactos (resiliencia), sin que ello implique una pérdida sustantiva o irreversible de los bienes y servicios ecosistémicos que proveen. Ello implica estudiar en detalle los ecosistemas estratégicos en cada región, de modo que pueda establecerse la naturaleza de los cambios que presenten o el tipo y magnitud de los impactos que los distintos escenarios del cambio climático puedan ocasionar sobre su funcionamiento, a partir de sus determinantes biofísicas y, en la medida de lo posible, identificar los puntos de inflexión de su resiliencia, a partir de los cuales estos se reorganizan y persisten en un nuevo estado. Es claro entonces que existen diferencias conceptuales en los puntos focales para la evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas al cambio climático y vacíos metodológicos para

evaluarla, a pesar de contar con un amplio marco teórico sobre el tema. En este contexto, si se quiere evaluar la vulnerabilidad que presenta un ecosistema dado ante el cambio climático es necesario plantear una metodología específica o un indicador que dé cuenta de ella, entendiendo que un índice de vulnerabilidad climática generalmente se deriva de la combinación de varios indicadores que se supone representan la vulnerabilidad (IPCC_AR5 2014).

De acuerdo con lo anterior, este documento presenta una propuesta en la que, a través de una serie de variables biofísicas, se evalúa la vulnerabilidad intrínseca de los ecosistemas de acuerdo con las condiciones propias de cada uno, mediante un caso de estudio en el cual se evalúa la vulnerabilidad al cambio climático del funcionamiento hidrológico de los páramos en Colombia, asociado a servicios ecosistémicos como la regulación hídrica y el abastecimiento de agua (Millennium_Ecosystem_Assessment 2005).

Metodología

Con el fin de plantear un método para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los ecosistemas, se siguieron tres pasos fundamentales:

1. Revisión del marco conceptual actual sobre la vulnerabilidad al cambio climático y de los índices empleados en estudios sobre el tema.
2. Formulación de un concepto de evaluación de vulnerabilidad al cambio climático, desde la perspectiva de las variables biofísicas propias de cada ecosistema, diferenciando la vulnerabilidad en sí que pueda tener un ecosistema (biofísica), de los efectos que las alteraciones en los servicios ecosistémicos, debido al cambio climático, puedan tener sobre una población (socioeconómica).
3. Propuesta de la ruta metodológica y de las variables biofísicas a tener en cuenta en un modelo conceptual para evaluar la vulnerabilidad hidrológica intrínseca de los ecosistemas.

En concordancia, se estudiaron las diferentes acepciones con las cuales se ha definido y evaluado la vulnerabilidad al cambio climático. En el primer paso se determina un concepto amplio de vulnerabilidad, asociado a un conjunto de términos además del grado de exposición y la sensibilidad del sistema. Una revisión de los métodos y de los indicadores utilizados en estudios de vulnerabilidad al cambio climático en el mundo, hechos a distintas escalas espaciales, permite separar los enfoques socio-económicos de aquellos basados en aspectos biofísicos o propios de los ecosistemas. A partir de los conceptos principales se definió una ruta metodológica que parte de la determinación de la escala de trabajo y el o los valores, dentro del ecosistema, su funcionamiento y/o los servicios ecosistémicos que éste presta, en los que se enfoca en estudio específico. Con dichos elementos es posible determinar los principales parámetros o variables biofísicas que den cuenta de la sensibilidad de ese valor específico. Por otro lado, también se definen las variables asociadas con el grado de exposición del sistema al cambio climático. Aunque dichas variables son principalmente climáticas, en este caso se consideran también variables de usos del suelo, que afectan la resiliencia del ecosistema y que provienen de actividades antrópicas.

Seguidamente se propone un modelo conceptual para la evaluación de la vulnerabilidad hidrológica ante el cambio climático, incluyendo las variables o parámetros seleccionados, que se está aplicando en una investigación en desarrollo en ecosistemas de páramo en Colombia, de la cual se espera una validación empírica del método.

Resultados y Discusión

El concepto de vulnerabilidad: diversas acepciones

La vulnerabilidad se refiere a la posibilidad que tiene un sistema de sufrir daños debido a la exposición a alguna amenaza, la cual se asocia con la merma en la capacidad que tiene el sistema para preservar su

estructura y su funcionamiento (Gallopín 2006). Para esto es necesario determinar si un cambio observado en un sistema es comportamental o estructural, para lo cual se requiere estudiar el sistema y su funcionamiento bajo estados normales y bajo efectos de ciertos fenómenos naturales o inducidos y su grado de resiliencia.

Sin embargo, el término vulnerabilidad se ha usado tradicionalmente en los estudios de amenazas y riesgos o en estudios de impacto ambiental, en los cuales la amenaza representa la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso, de origen natural o antrópico, durante cierto período de tiempo, en un sitio determinado, mientras que la vulnerabilidad se entiende como la susceptibilidad de un medio físico de un territorio o sistema a la acción de la amenaza (Ingeominas, 1998). En otras palabras, la vulnerabilidad es un factor de riesgo interno del sistema expuesto a la amenaza y corresponde a su disposición intrínseca a ser dañado (Paniagua 1995). Finalmente el riesgo es el producto de los dos anteriores, es decir, representa las consecuencias de la combinación entre un cierto grado de amenaza y un nivel de vulnerabilidad del sistema amenazado (Ayala-Caicedo, 1993, citado por Mardones & Vidal 2001).

En este sentido se reconoce que la vulnerabilidad es intrínseca al estado en el que se encuentra el medio físico o sistema, lo cual está asociado con su nivel de resiliencia, y no una valoración de los efectos causados por el fenómeno o amenaza. Mientras que en el primer caso no existe un consenso sobre las variables que determinan dicha vulnerabilidad, es ampliamente conocido que los efectos que puede causar un desastre varían dependiendo de la naturaleza del fenómeno, específicamente su intensidad y duración, pero igualmente de las características propias de la población o sistemas expuestos (Cardona 1993). En este caso la evaluación del riesgo está en función de:

$$R_t = (E.R_s) = (E.H.V) \quad (1)$$

Donde R_t es el riesgo total, E representa los elementos en riesgo específico (R_s), H es el grado de amenaza y V la vulnerabilidad (Cardona 1993).

En consecuencia, la diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo está en que la amenaza se relaciona con la probabilidad de que se manifieste un evento natural o un evento provocado, mientras que el riesgo está relacionado con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias negativas o efectos, los cuales están íntimamente relacionados no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos sino también con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento (Fournier, 1985). Por este motivo el concepto de vulnerabilidad toma fuerza y se convierte en un elemento de estudio básico para la evaluación y prevención de riesgos.

Un caso particular de amenazas y riesgos, ampliamente reconocido y aceptado, tiene que ver con los cambios en las condiciones globales que pueden poner en riesgo la estabilidad de los sistemas naturales y humanos. Estos cambios están específicamente relacionados con el incremento en las concentraciones de Gases con Efecto Invernadero (GEI) y aerosoles que repercuten en cambios regionales y mundiales de la temperatura, la precipitación y otras variables climáticas. Algunos autores sugieren clasificar las amenazas asociadas con el cambio climático global en tres tipos: i) amenazas recurrentes discretas como tormentas o sequías extremas; ii) amenazas continuas como incrementos en las temperaturas o disminución en las precipitaciones que ocurran durante décadas (Brooks et al. 2005), y iii) amenazas singulares discretas como cambios en regímenes climáticos asociados con alteraciones en la circulación oceánica (Roberts, 1998; Cullen et al., 2000, citados por Brooks 2003). Es evidente entonces que, en los tres tipos de amenazas, el cambio climático tiene un efecto inicial sobre el medio natural o biofísico, el cual sufre alteraciones que afectan a la población humana. En otras palabras, los seres humanos nos vemos afectados por las amenazas relacionadas con cambio climático, en la medida que ellas modifiquen

las condiciones o el funcionamiento natural de los ecosistemas y los servicios que éstos prestan, de acuerdo con la magnitud y rapidez de dicho cambio (IPCC 1997).

La vulnerabilidad está en función de los impactos que recibe el sistema y su capacidad de respuesta, que a su vez son función del grado de exposición y de su sensibilidad (Figura 1). No obstante, el hecho de hacer depender la vulnerabilidad de un sistema del grado de exposición equivale a decir que un sistema que no es expuesto a perturbaciones debe definirse como no vulnerable, lo que podría ser un error (Gallopín, 2006).

Como se observa, existen diferentes enfoques frente a la comprensión de la vulnerabilidad, dependiendo de la perspectiva de cada autor (Füssel 2005). A menudo los científicos sociales y los del clima se refieren a cosas distintas cuando usan el término “vulnerabilidad”. Mientras que la mayoría de los autores tienden a asociarla con el conjunto de factores socio-económicos que determinan la habilidad de las personas para enfrentar situaciones de estrés o de cambio (Füssel 2005), los científicos del clima entienden la vulnerabilidad como la propensión a ser afectado adversamente por eventos relacionados con el clima (Agard & Schipper 2014)

De acuerdo con Brooks (2003), las definiciones de vulnerabilidad en el campo del cambio climático tienden a caer en dos categorías principales (figura 2):

una que ve la vulnerabilidad en términos del daño potencial que algún evento o amenaza relacionada con escenarios climáticos puede causar a un sistema y cuyo análisis concluye con estudios de impacto biofísico y la identificación de opciones de adaptación (Agard & Schipper 2014), y otra que lo considera como un estado inherente a un sistema que existe incluso antes de enfrentar algún evento de amenaza (Pelling 2003). De acuerdo con la definición de IPCC_AR5 (2014), ésta forma de vulnerabilidad se refiere a la inhabilidad de lidiar con presiones o cambios externos como las condiciones de cambio climático, en donde se reconoce que la vulnerabilidad contextual es una característica de los sistemas sociales y ecológicos generados por múltiples factores y procesos (O'Brien et al. 2007).

Además de la diversidad de acepciones relacionadas con el concepto de vulnerabilidad, se encuentra en la literatura una gran variedad de términos asociados tales como resiliencia, sensibilidad, estrés, exposición, impacto, capacidad de adaptación y capacidad de respuesta (Füssel & Klein 2006; Füssel 2007; Swanston et al. 2011; Tremblay & Anderson 2008; Venevsky 2006; Brooks 2003; Füssel 2005; Gallopín 2006; IPCC 1997; IPCC 2001). Si bien hay un cierto consenso con respecto a las definiciones de estos términos, su inclusión o no en cada evaluación de vulnerabilidad, al igual que la manera como se incorpora, se mide o se evalúa cada componente,

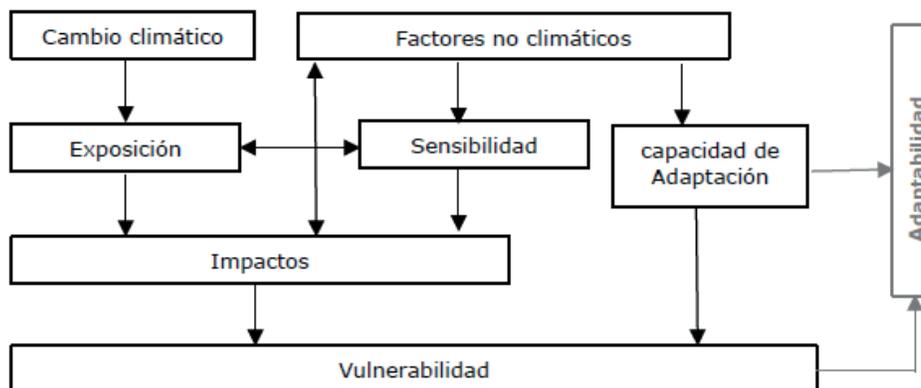


Figura 1. Elementos que conforman la vulnerabilidad de un sistema. Adaptado de Füssel (2010)

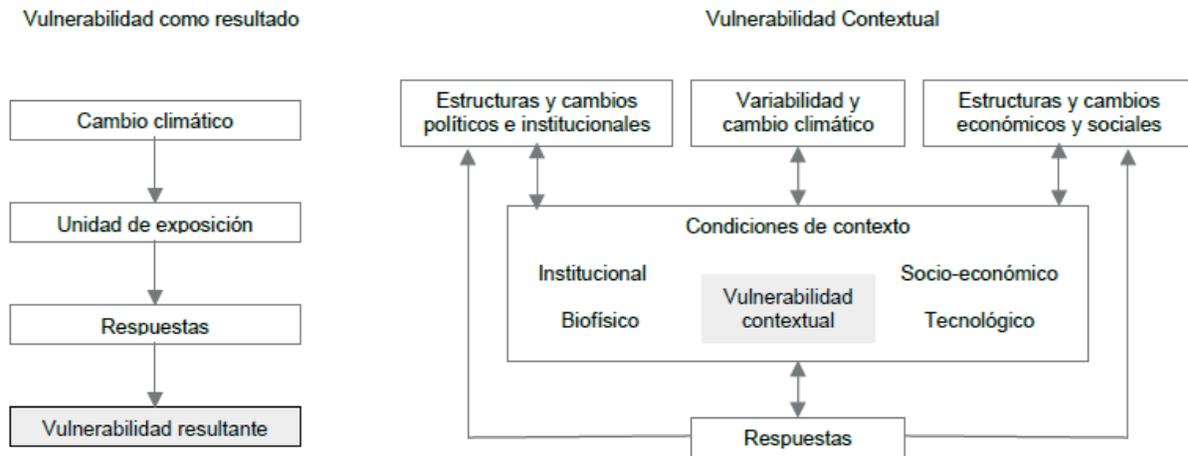


Figura 2. Marcos que representan dos interpretaciones de la vulnerabilidad al cambio climático: (a) la vulnerabilidad como resultado y (b) la vulnerabilidad contextual. Adaptado de O'Brien, et al (2007).

sigue siendo una cuestión subjetiva que depende del autor y del tipo de estudio.

Según IPCC (2001) la sensibilidad se refiere al grado en el cual un sistema es afectado, bien sea de manera adversa o benéfica, por el clima. De acuerdo con (Gallopín 2006), la sensibilidad es una propiedad inherente del sistema, distinta de su capacidad de respuesta, por tanto, es un atributo del sistema que existe previo a la perturbación e independiente de la exposición.

Por su parte, la resiliencia en su acepción original se formuló como la habilidad de un sistema de mantener su estructura y patrones de comportamiento en presencia de factores externos, generalmente causantes de estrés (Holling 1973). En otras palabras, la resiliencia es la capacidad que tiene un sistema social, económico o ambiental de absorber las perturbaciones, responder y reorganizarse mientras que es sometido a un cambio, manteniendo las mismas funciones, estructura, identidad y retroalimentaciones (Walker et al. 2004; Agard & Schipper 2014).

En la evaluación de la vulnerabilidad cabe aclarar también el origen de la amenaza que genera dicha situación, específicamente cuando se hace referencia a estrés y a perturbación: El estrés es una presión continua o que se incrementa lentamente, dentro del rango de la variable y a menudo se genera dentro del sistema. Las perturbaciones son los picos mayores en la presión que va más allá del rango normal de variabilidad dentro del cual opera el sistema y generalmente son de origen externo (Gallopín 2006).

Por su parte, la exposición se refería inicialmente a la naturaleza y el grado al cual un sistema experimenta estrés ambiental o socio-político, teniendo en cuenta la magnitud, frecuencia, duración y la extensión espacial de la amenaza (Burton et al. 1993), acepción que se retoma en este trabajo, a pesar de la más reciente definición dada por IPCC_AR5 (2014), que indica que la exposición se refiere a cualquier cosa, bien o ser⁴ en lugares o condiciones que puedan verse afectadas negativamente, ya que, si se acepta que el cambio climático está ocurriendo a escala global, tal definición abarca al planeta por

4. Textualmente se define como "la presencia de personas, vecindarios, especies o ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura o bienes económicos, sociales o culturales en lugares y condiciones que podrían ser afectados negativamente" (Agard & Schipper 2014).

igual. Asimismo, la adaptación es definida por IPCC (2014) como el proceso de acomodación al clima actual o esperado y sus efectos. De acuerdo con el grupo de trabajo II, en los sistemas humanos la adaptación tiene por objeto mitigar o evitar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos, mientras que en algunos sistemas naturales la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima esperado y sus efectos (IPCC_AR5 2014). Es claro que se trata entonces de un proceso que requiere de tiempo. La capacidad adaptativa representa el potencial más que la adaptación actual del sistema, por tanto, una alta capacidad adaptativa solo reduce la vulnerabilidad del sistema ante amenazas que puedan ocurrir en el futuro o ante amenazas que impliquen cambios lentos durante períodos relativamente largos ante los cuales el sistema puede adaptarse (Brooks 2003).

En definitiva, existen muchas variables que intervienen en la determinación de la vulnerabilidad, incluyendo la consideración de factores naturales o biofísicos y antrópicos (socio-económicos, institucionales, políticos, de infraestructura, entre otros), que cambian según el alcance, los objetivos, la información disponible, la escala del estudio, el autor, etc. En todo caso, tiene poco sentido hablar de la vulnerabilidad y de la capacidad de adaptación de un sistema sin especificar el riesgo al cual éste es vulnerable o al cual debe adaptarse, ya que es posible que un sistema tenga la capacidad de adaptarse a un tipo de amenazas, pero no a otras. Por tanto, varios autores han concluido que el término “vulnerabilidad” solo debe usarse con respecto a una situación vulnerable en particular, es decir, la vulnerabilidad debe ser evaluada frente a una amenaza o un rango de amenazas determinadas, y haciendo la distinción entre la vulnerabilidad actual y la futura (Brooks 2003; Füssel 2005).

Vulnerabilidad biofísica y vulnerabilidad socioeconómica: una diferenciación relevante

Varios autores coinciden en que los factores determinantes de la vulnerabilidad pueden

diferenciarse en socioeconómicos y biofísicos, y éstos a su vez en factores de carácter interno al sistema o factores externos. Como se ha indicado anteriormente, a pesar del completo trabajo del WGI, reuniendo y presentando las evidencias del cambio climático global, sus causas y las proyecciones (IPCC 2013), al igual que la revisión de los impactos que se han generado sobre distintos elementos biofísicos por estos cambios (Jiménez et al. 2014; Settele et al. 2014; Oppenheimer et al. 2014), no se presentan evaluaciones de la vulnerabilidad de dichos sistemas de acuerdo con las definiciones dadas por el mismo IPCC, sino que se presentan en términos de impactos y proyecciones de los mismos, mientras que la vulnerabilidad se sigue evaluando desde una perspectiva predominantemente socioeconómica cuando se incluye el componente de sensibilidad.

Por ende, al utilizar indicadores pensados desde la perspectiva socioeconómica no se está haciendo una evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas, sino un estudio de impacto de los fenómenos, lo que no permite tomar decisiones de fondo para disminuir el riesgo o corregir el problema, desde el sistema (ecosistema) sino desde las afectaciones, aunque se reconoce que los estudios de impacto pueden ayudar a identificar indicadores relevantes y a determinar ciertos umbrales de vulnerabilidad. Un ejemplo de lo anterior son los indicadores para los recursos hídricos del cap. 3 del IPCC_AR5 (Jiménez et al. 2014), que evalúan, para la escala global, la disminución de los recursos hídricos renovables y subterráneos, la exposición a inundaciones, cambios en la demanda de agua para riego, cambios en el régimen de flujo de los ríos de permanentes a intermitentes o viceversa y escases de agua. De acuerdo con Brooks (2003), es posible diferenciar entre una y otra aproximación, gracias a las diferencias entre la vulnerabilidad biofísica y el concepto de amenazas naturales y el estudio de la vulnerabilidad social, lo que puede ubicarse dentro del marco del manejo del riesgo.

Una aproximación más completa a la evaluación de la vulnerabilidad, fue realizada por el Servicio Forestal de EEUU, quienes con el propósito de diferenciar

los elementos biofísicos de los socioeconómicos en estudios de vulnerabilidad, denominaron los factores “naturales” como la sensibilidad del sistema y los factores antropogénicos como riesgos, de manera que al combinar estos dos tipos de indicadores se obtuvo una medida de la sensibilidad total, tanto del sistema como de las poblaciones potencialmente afectadas (Furniss et al. 2013). En este ejercicio se hizo una diferenciación entre factores amortiguadores y factores estresores. Los primeros se refieren a los que incrementan la capacidad de resiliencia del sistema, es decir, disminuyen su sensibilidad, y los estresores son los que incrementan la sensibilidad del sistema ante los fenómenos (Furniss et al. 2013). Otra aproximación a indicadores biofísicos de vulnerabilidad para especies fue propuesta por NatureServe, la cual ha sido aplicada con éxito en distintos ecosistemas (Ohlemüller et al. 2008; Lawler et al. 2009; Pacifici et al. 2015) con un énfasis de biodiversidad. A diferencia de estos índices, en este trabajo se piensa más en los bienes y servicios que el funcionamiento de los ecosistemas brinda a los seres humanos.

A pesar de que el concepto de un sistema socio-ecológico refleja la idea de que la acción humana y las estructuras sociales son integrales a la naturaleza y que, por tanto, cualquier distinción entre sistemas sociales y naturales es arbitraria (Berkes & Folke 1998), es claro que los sistemas naturales se refieren a aquellos que soportan los procesos biológicos y biofísicos, mientras que los sistemas sociales están basados en reglas e instituciones que median el uso humano de recursos, así como los sistemas de conocimiento y ética que interpretan los sistemas naturales desde una perspectiva antropocéntrica (Adger 2006). En este contexto es claro que hay diferencia entre la vulnerabilidad social, por ejemplo, a los cambios ambientales asociados con el cambio climático y la vulnerabilidad del ambiente propiamente dicho. No obstante, la estrecha relación que existe entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano propicia una tendencia a confundirlos o a asimilarlos como si fueran una misma cosa. De ahí que, si un ecosistema

prestador de servicios ambientales es altamente vulnerable a una amenaza dada, la comunidad que depende de esos servicios ambientales también lo será en la medida que este servicio sea afectado.

De acuerdo con lo anterior, una perspectiva en la evaluación de la vulnerabilidad debería ser la evaluación de la vulnerabilidad biofísica de los ecosistemas estratégicos, en la medida que éstos pueden determinar el grado de sostenibilidad de la población para la cual son estratégicos (Agudelo 2007). Esto implica que la vulnerabilidad debe ser definida desde una serie de variables biofísicas, con fundamento en cada sistema en específico, considerando que la vulnerabilidad biofísica es función del grado de susceptibilidad del sistema a una amenaza natural o fenómeno y su capacidad de resiliencia, así como de la frecuencia y la magnitud de la amenaza.

Una ventaja de realizar estudios de vulnerabilidad natural o de sistemas naturales en función de variables biofísicas es que, cuando se trata de estudios de vulnerabilidad en sistemas naturales o ecosistemas específicos es posible encontrar cierta homogeneidad en cuanto a los factores de estrés o de perturbación como aquellos capaces de alterar su funcionamiento o su estructura, lo cual, aunque los umbrales de los factores causantes del estrés puedan variar entre ecosistemas, da la posibilidad de generalizar modelos o indicadores para cada tipo de ecosistema o de proceso estudiado. Por su parte, una evaluación de vulnerabilidad en sistemas socioeconómicos puede incorporar una infinidad de variables y de factores de estrés que pueden diferir entre escalas (local, regional o global) y entre casos específicos, de acuerdo con las amenazas a las que se vean sometidos por su localización geográfica y demás características socio-económicas y culturales específicas del sistema, las cuales son independientes entre sí (Füssel 2005).

De cualquier forma, un análisis separado no implica desconocer la estrecha interdependencia que tienen estas dos dimensiones ya que cualquier decisión de acervo político, cultural o como repercusión de las condiciones económicas externas tiene consecuencias

casi inmediatas en los ecosistemas aledaños, bien sea en términos de conservación o de deterioro. Es por ello que, además de insistir en la necesidad de estudiar la vulnerabilidad de los sistemas naturales con base en variables biofísicas, también se sugiere recurrir a una priorización de los sistemas a ser evaluados, a través de una caracterización o clasificación de los ecosistemas, de acuerdo con el tipo y la importancia de los bienes y servicios que ellos proveen, o de la cantidad de población beneficiada por el flujo de servicios ambientales que generan. En otras palabras, si bien todos los ecosistemas y remanentes de vegetación natural son importantes, existen algunos que proporcionan recursos vitales y limitados, como la provisión de agua, alimentos y materias primas, entre otros, por lo que se constituyen en ecosistemas estratégicos para la supervivencia humana y la sostenibilidad ambiental de la sociedad.

Evaluación de la vulnerabilidad biofísica de los ecosistemas⁵

A continuación se propone una serie de parámetros y variables como indicadores para evaluar la vulnerabilidad biofísica de los ecosistemas. Se proponen además métodos de evaluación y se presenta, a manera de ejemplo, un caso de estudio en el cual se evalúa la vulnerabilidad que tienen los ecosistemas de páramo ante el cambio climático. Esto con el fin de hacer una evaluación objetiva, replicable y comparable de la vulnerabilidad biofísica de ecosistemas.

La evaluación de la vulnerabilidad biofísica de los ecosistemas debe enfocarse en el estudio de la vulnerabilidad intrínseca de un sistema específico, ante una amenaza o un rango de amenazas determinadas, y haciendo la distinción entre la vulnerabilidad actual y la futura (Brooks 2003; Füssel 2005). Por tanto, se plantean indicadores y el método para el estudio de la vulnerabilidad de ecosistemas

en su funcionamiento hidrológico, que determina la cantidad y continuidad en el abastecimiento de agua, de modo que, en este contexto, podría entenderse como una amenaza la reducción o pérdida de dichos servicios ecosistémicos como consecuencia de cambios en el rendimiento hídrico o en su capacidad de regulación hidrológica, debido a los efectos del cambio climático. A manera de ejemplo, Buytaert et al. (2010) indican el grado de vulnerabilidad de los páramos ante el cambio climático. De acuerdo con estos autores, cambios en el régimen climático en ecosistemas de páramo podrían generar cambios sustanciales en la vegetación, específicamente en la diversidad de especies y la fragmentación de los ecosistemas, efectos en los suelos y el carbón almacenado en estos y cambios sustanciales en el ciclo hidrológico de estos ecosistemas (Buytaert et al. 2010). Esto implica que existen una serie de factores biofísicos que determinan la vulnerabilidad de los ecosistemas frente al cambio climático.

Para delimitar el objeto de estudio es recomendable definir los valores o las características de interés, así como la escala de trabajo ya que, aunque se trate de recursos hídricos, los valores pueden ir desde el caudal disponible para abastecimiento de agua a una población o para generación eléctrica, hasta usos recreativos, valores paisajísticos o la conservación de especies acuáticas asociadas. En concordancia, para evaluar la sensibilidad hidrológica de los ecosistemas, se deben identificar áreas, en este caso cuencas hidrográficas como la unidad espacial integral y representativa del ecosistema dado, en donde es posible medir las entradas, los flujos internos y las salidas de agua. Estas mediciones permiten conocer la manera como los ecosistemas funcionan bajo los regímenes climáticos actuales y proyectar, a través de modelos de simulación, sus respuestas al cambio climático en términos de cambios en los procesos hidrológicos y su magnitud, medibles en forma

5. Adaptado de la propuesta de tesis doctoral titulada "Ecohidrología de los páramos en Colombia: vulnerabilidad ante el cambio climático y cambios en el uso del suelo", en desarrollo.

de rendimiento hídrico y respuestas a eventos de precipitación.

La exposición del ecosistema está determinada, en parte, por los cambios ocurridos (ej. cambios en el uso del suelo), y por la magnitud, frecuencia, duración y la extensión espacial de la amenaza (cambio climático). Es necesario conocer las condiciones actuales, valores y comportamiento de las variables meteorológicas del sitio, como una línea base, para luego considerar escenarios hipotéticos de acuerdo con las tendencias regionales y locales de cambio climático, esencialmente cambios en la precipitación y temperatura, entre otras variables que, según las características del ecosistema, sean relevantes para determinar las entradas o las salidas de agua del mismo. En este caso, la herramienta de modelación hidrológica permite simular los cambios, sin necesidad de introducirlos al ecosistema o aún, sin que éstos hayan ocurrido en efecto.

Así, la vulnerabilidad hidrológica de un ecosistema al cambio climático, está dada en función del grado de exposición, el clima, los suelos, la topografía y la vegetación, así como las actividades humanas – usos del suelo– que pueden afectar la resiliencia del sistema. Para el caso específico de ecosistemas de alta

montaña tropical, se han considerado las siguientes variables para el análisis de su vulnerabilidad hidrológica, cuya significancia será verificada en la validación del modelo en ecosistemas de páramo: variables hidrometeorológicas, por lo menos temperatura, precipitación y caudal; alteraciones de las coberturas naturales, propiedades hidrofísicas de los suelos. Para el ejercicio puntual que se está desarrollando, las variables mencionadas se midieron directamente en campo, incluidas las entradas por precipitación horizontal.

A partir del concepto de vulnerabilidad y las variables seleccionadas, se desarrolló un modelo conceptual que integra los valores de las variables de vulnerabilidad y que permite determinar, mediante pruebas de sensibilidad, calibración y validación, la relevancia de dichas variables y su grado de control sobre la variable de respuesta que, para este caso, es el caudal de la cuenca en estudio (Figura 3). Al mismo tiempo, el proceso de calibración del modelo hidrológico permite determinar el grado de incidencia de las distintas variables sobre la sensibilidad de los procesos hidrológicos en la cuenca, que se ven reflejados en las variaciones que sufre la variable de respuesta (ej. Caudal). En este

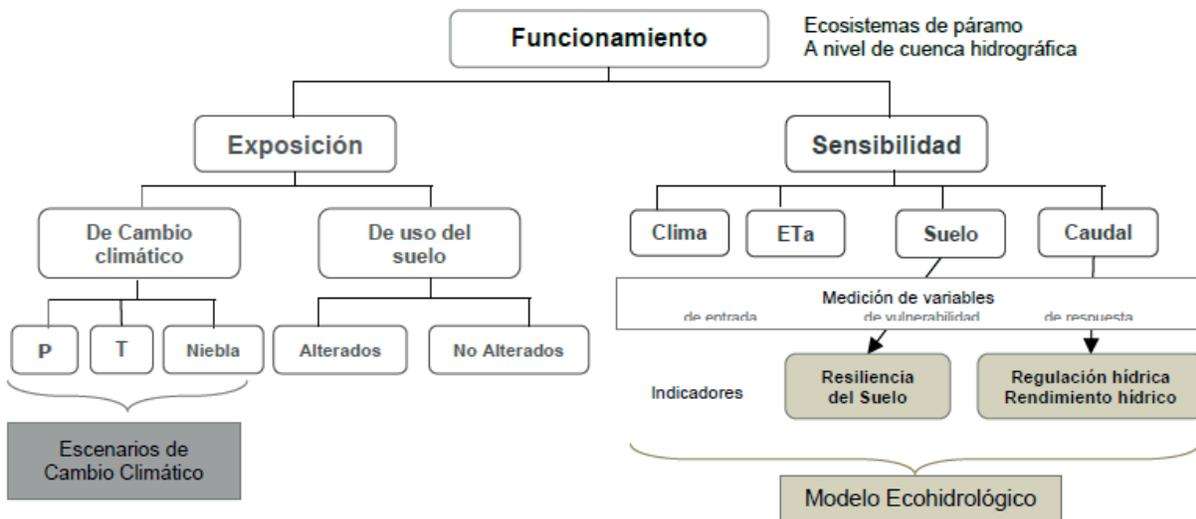


Figura 3. Modelo conceptual para la evaluación de la vulnerabilidad hidrológica de un ecosistema al cambio climático.

caso, es importante separar los efectos causados por cambios en el uso del suelo, de los causados específicamente por el cambio climático. Por tanto, la calibración de los parámetros y su validación, se hacen para las mismas cuencas representativas de tres páramos colombianos: uno no intervenido, un segundo páramo ligeramente intervenido con ganadería extensiva y otro muy intervenido aun en la actualidad (agricultura seguida de ganadería, con degradación intensa de los suelos).

Una vez el modelo hidrológico sea calibrado y validado para las condiciones actuales, con base en las mediciones de campo, es posible determinar el grado de vulnerabilidad del ecosistema, induciendo cambios en las variables de entrada. Para las proyecciones se utilizarán escenarios hipotéticos de cambio, fundamentados en los análisis y predicciones sobre los cambios esperados tanto en el régimen de temperaturas, como en la precipitación para la alta montaña en Colombia hechos por expertos, a partir de los escenarios futuros propuestos por el IPCC y de los registros existentes (Ruiz et al. 2012; Carmona & Poveda 2014; Ruiz 2010). Esto permite identificar un punto de inflexión, a partir del cual el nivel de exposición -entendido como el conjunto de cambios esperados o proyectados en las variables climáticas- genere alteraciones significativas en términos de cambios en los procesos hidrológicos (flujos) y la respuesta de la cuenca (el caudal) a las excitaciones generadas al sistema, de acuerdo con los escenarios hipotéticos generados, pero igualmente permitirá estimar las magnitudes de dichos cambios.

La vulnerabilidad hidrológica de cada cuenca, representativa del funcionamiento hidrológico de un ecosistema, estará definida entonces por la magnitud de las alteraciones en su respuesta hidrológica como consecuencia del cambio climático, de acuerdo con el grado de alteración o impacto que presenten algunas variables de vulnerabilidad. Así, los niveles de vulnerabilidad, generalmente expresados como altos, medios o bajos, pueden establecerse con base en los cambios porcentuales, con respecto a los regímenes de caudales tomados como línea base.

Conclusiones

Hasta la fecha la mayoría de los estudios de vulnerabilidad al cambio climático evalúan la vulnerabilidad de las poblaciones, desde una perspectiva predominantemente socio-económica y antropocéntrica, con excepciones como la aproximación de NatureServe desde la biodiversidad. Esta evaluación es subjetiva a los impactos causados a la población por la ocurrencia de un fenómeno en específico y no considera los efectos que el cambio climático pueda tener a futuro sobre los bienes y servicios que los ecosistemas estratégicos nos prestan, es decir, una evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del ecosistema.

La propuesta de este ejercicio implica que la vulnerabilidad sea definida desde una serie de variables biofísicas, de acuerdo con las características de cada sistema en específico y en los valores de interés para el estudio. Así, se propone una serie de variables que permiten estimar el grado de vulnerabilidad del funcionamiento hidrológico de los ecosistemas ante el cambio climático. Igualmente, se propone una ruta metodológica, con fundamento en un modelo conceptual, para hacer una evaluación de la vulnerabilidad -hidrológica- de un ecosistema.

Mediante la aplicación del modelo se puede determinar la magnitud de los cambios que, distintos escenarios de exposición al cambio climático pueden generar sobre el ecosistema, con base en su sensibilidad y el grado de alteración de las variables y procesos internos del ecosistema. Esta metodología se está validando actualmente en una investigación que busca definir la vulnerabilidad hidrológica de los ecosistemas de páramo en Colombia ante el cambio climático.

Referencias

- Adger, N., 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16, pp.268–281. Available at: www.elsevier.com/locate/gloenvcha.
- Agard, J. & Schipper, L., 2014. Glossary. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and*

- Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 1757–1776.
- Agudelo, L.C., 2007. Sostenibilidad ecológica urbana. Lo global y lo local-regional. In *Conferencia LLa globalización neoliberal y la planeación urbano-regional. Perspectivas para América Latina.*
- Arribas, P. et al., 2012. La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 21(3), pp.79–84. Available at: <http://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/701>.
- Beniston, M., Diaz, H.F. & Bradley, R.S., 1997. Climatic change at high elevation sites: An overview. *Climatic Change*, 36(3-4), pp.233–251. Available at: <http://www.sinab.unal.edu.co:2483/article/10.1023/A:1005380714349>.
- Berkes, F. & Folke, C. eds., 1998. *Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience*, New York: Cambridge University Press.
- Brooks, N., 2003. Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper*, 38, pp.1–16. Available at: <http://www.tyndall.ac.uk/sites/default/files/wp38.pdf>.
- Brooks, N., Adger, N. & Kelly, P.M., 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change*, 15(2), pp.151–163. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378004000913>.
- Burton, I., Kates, R.W. & White, G.F., 1993. *The Environment as hazard* second ed., New York: Guilford.
- Buytaert, W. et al., 2010. Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7).
- Cardona, O.D., 1993. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. En: A. Maskrey (ed.) *Los desastres no son naturales*, pp.51–74. Available at: <http://187.141.49.252/sii/images/7.pdf>.
- Carmona, A.M. & Poveda, G., 2014. Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, 123(2), pp.301–313.
- Chen, I. et al., 2011. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), pp.1024–1026. Available at: www.scopus.com.
- Furniss, M. et al., 2013. *Assessing the vulnerability of watersheds to climate change: results of national forest watershed vulnerability pilot assessments*, Portland, OR.
- Füssel, H.M., 2010. *Review and quantitative analysis of indices of climate change exposure, adaptive capacity, sensitivity and impacts*, Germany: Postdam Institute for Climate Impact Research.
- Füssel, H.M., 2005. Vulnerability in climate change research: a comprehensive conceptual framework. Available at: <http://escholarship.org/uc/item/8993z6nm.pdf>.
- Füssel, H.M., 2007. Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17(2), pp.155–167. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378006000525>.
- Füssel, H.M. & Klein, R.J.T., 2006. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 75(3), pp.301–329. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-006-0329-3>.
- Gallopín, G.C., 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), pp.293–303.

- Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378006000409> [Accessed July 9, 2014].
- Gómez-Baggethun, E. & De Groot, R., 2007. Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. *Ecosistemas*, 16(3), pp.4–14. Available at: http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=496&Id_Categoria=1&tipo=portada.
- Hassan, R., Scholes, R. & Abel, N. eds., 2005. *Ecosystems and human wellbeing: Current state and trends*, Washington D.C: Island Press.
- Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, pp.1–23. Available at: http://www.uni-kassel.de/beckenbach/files/pdfs/lehre/advanced_economics/WS11_12/Texte/Holling_ResilStabilEcolSys.pdf.
- IPCC_AR5, W.G. 2, 2014. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, p. 44. Available at: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- IPCC, W.G. 1, 2013. Resumen técnico. In T. Stocker et al., eds. *Cambio climático 2013. Bases físicas*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, p. 222.
- IPCC, W.G. 2, 2001. Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Available at: <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/synthesis-spm/synthesis-spm-es.pdf>.
- IPCC, W.G. 2, 2002. *Cambio climático y biodiversidad, documento técnico V del IPCC OMM-PNUD.*, Ginebra.
- IPCC, W.G. 2, 1997. *Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad OMM, PNUMA.*,
- Jiménez, B. et al., 2014. Freshwater resources. In and L. L. W. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, ed. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 229–269. Available at: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=15236969.
- Klein, R. ed., 2004. Vulnerability indices - An academic perspective. *Expert Meeting "Developing a Method for Addressing Vulnerability to Climate Change and Climate Change Impact Management: To Index or Not To Index?"* Available at: <http://www.pik-potsdam.de/eva/>.
- Lawler, J. et al., 2009. Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology*, 90(3), pp.588–597.
- Mardones, M. & Vidal, C., 2001. La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *EURE (Santiago)*, 27(81), pp.97–122. Available at: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612001008100006&script=sci_arttext.
- Martínez, R., Jorgensen, P. & Tiessen, H., 2011. *Climate change and biodiversity in the tropical Andes*, São José dos Campos: Inter-American Institute for Global Change Research.
- Millennium_Ecosystem_Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, Washington D.C: Island Press.
- O'Brien, K. et al., 2007. Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Climate Policy*, 7(1), pp.73–88.
- Ohlemüller, R. et al., 2008. The coincidence of climatic and species rarity: high risk to small-

- range species from climate change. *Biology letters*, 4, pp.568–572. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- Oppenheimer, M. et al., 2014. Emergent risks and key vulnerabilities. In and L. L. W. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, ed. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 1039–1099.
- Pacifici, M. et al., 2015. Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5(3), pp.215–224.
- Paniagua, S., 1995. Los desastres naturales y sus implicaciones en América Central. *Revista geológica de América Central*, 18, pp.107–112. Available at: <http://www.cridlac.org/digitalizacion/pdf/spa/doc13914/doc13914-contenido.pdf>.
- Pelling, M. ed., 2003. *Natural disasters and development in a globalizing world*, Routledge: Psychology Press.
- Ruiz, D., Martinson, D.G. & Vergara, W., 2012. Trends, stability and stress in the Colombian Central Andes. *Climatic Change*, 112(3-4), pp.717–732.
- Ruiz, J.F., 2010. *Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011 - 2100)*, Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.
- Sergey, V., 2006. A method for integrated assessment of vulnerability to climate change in Siberian forests: Example of larch area. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, pp.241–268.
- Settele, J. et al., 2014. Terrestrial and inland water systems. In and L. L. W. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, ed. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 271–359.
- Swanston, C. et al., 2011. *Ecosystem vulnerability assessment and synthesis: A report from the climate change response framework project in northern Wisconsin*, Delaware, OH: USDA Forest Service. Available at: <http://www.nrs.fs.fed.us/>.
- Tremblay, L. & Anderson, E.R., 2008. *A preliminary assessment of ecosystem vulnerability to climate change in Panama*, Clayton, Panamá: McGill University and the Smithsonian Tropical Research Institution.
- Venevsky, S., 2006. A Method for Integrated Assessment of Vulnerability to Climate Change in Siberian Forests: Example of Larch Area. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, pp.241–268.
- Walker, B. et al., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2). Available at: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>.
- Watson, J.E.M., Iwamura, T. & Butt, N., 2013. Mapping vulnerability and conservation adaptation strategies under climate change. *Nature Climate Change*, advance on. Available at: <http://www.nature.com/nclimate/journal/vaop/ncurrent/full/nclimate2007.html>.
- Young, B.E. et al., 2015. *Guidelines for using the NatureServe Climate Change Vulnerability Index*, Arlington, VA: NatureServe.
- Young, B.E., Young, K.R. & Josse, C., 2011. Vulnerability of tropical andean ecosystems to

climate change. In *Climate change and biodiversity in the tropical Andes*. pp. 170–181. Available at: <http://www.iai.int/files/communications/>

[publications/scientific/Climate_Change_and_Biodiversity_in_the_Tropical_Andes/chapter11.pdf](http://www.iai.int/files/communications/publications/scientific/Climate_Change_and_Biodiversity_in_the_Tropical_Andes/chapter11.pdf).

Citar este artículo como:

Cárdenas, M. y Tobón, C. 2016. “Evaluación de la vulnerabilidad biofísica de los servicios ecosistémicos ante el cambio climático: una aproximación conceptual y metodológica.” *Gestión y Ambiente* 19(1): 163-176.