



Clasificación de humedales en áreas alteradas por minería aluvial

Jorge A. Villa¹

Wetlands classification in alluvial mining zones

Classificação de pantanais nas áreas alteradas por mineração aluvial

RESUMEN

Introducción. Este trabajo tuvo como objetivo formular un método para la clasificación de ecosistemas de humedal en zonas alteradas por minería aluvial y su posterior aplicación a un caso particular en el valle aluvial del río Nechí. **Materiales y métodos.** Se utilizó un índice calculado a partir de un análisis de componentes principales de 7 variables que son indicadores del funcionamiento y / o de la presión sobre estos ecosistemas en el componente físico, físico-químico y biológico. **Resultados.** Los resultados para el estudio de caso permitieron la generación de un índice con base en 3 componentes principales, explicando hasta un 66 % de la variabilidad del conjunto de datos. Los valores de este índice permitieron clasificar en una escala relativa a los humedales desde los más cercanos a los ecosistemas de referencia en la zona hasta los más alejados de estos. **Conclusiones.** La agrupación de los humedales directamente impactados por la minería de aluvión permitió identificar tres grupos de acuerdo con su cercanía a los de referencia de la zona en cuanto a las variables evaluadas: alejados, intermedios y cercanos. Con base en esta agrupación se propone enfocar las actividades de manejo de la siguiente manera: conservación en el grupo más cercano a los de referencia, actividades de restauración en el grupo más alejado de estos y actividades mixtas en el grupo intermedio.

Palabras clave: gestión ambiental, manejo de humedales, análisis de componente principales, ingeniería ecológica.

¹ Doctor en Ciencias Ambientales. Grupo GAMA, Docente instructor. Corporación Universitaria Lasallista. Carrera 51 # 118s – 57, Caldas, Antioquia. ORCID: 0000-0003-1130-9401

Artículo recibido: 19/10/2017; Artículo aprobado: 08/05/2017
Autor para correspondencia: Jorge A. Villa, email: jorvilla@lasallistadocentes.edu.co

ABSTRACT

Introduction. The objective of this study was to develop a wetland classification method for alluvial mining landscapes and to apply it in a case study in the

Nechi River Valley as a basis for the decision-making processes for wetland management. **Materials and Methods.** A principal component analysis (PCA) was used with 7 variables indicators of wetland functioning and/or pressure in the physical, physicochemical and

biological dimension. **Results.** A classification index was made using the first 3 principal components resulting from the component analysis explaining as much as 66 % of the total variability in the data. The index values allowed the relative classification of the wetlands from the closest to the ecological optimum to the more distant from this. **Conclusion.** A wetland

grouping based on the index statistics is created and its implication for the environmental management plan are discussed.

Key words: environmental management, principal component analysis, wetland management, ecological engineering.

RESUMO

Introdução. Este trabalho teve como objetivo formular um método para a classificação de ecossistemas de pantanais nas zonas alteradas por mineração aluvial e sua posterior aplicação a um caso particular no vale aluvial do Río Nechí. **Materiais e métodos.** Se utilizou um índice calculado a partir de uma análise de componentes principais de 7 variáveis que são indicadoras do funcionamento e / ou da pressão sobre estes ecossistemas no componente físico, físico-químico e biológico. **Resultados.** Os resultados para o estudo de caso permitiram a geração de um índice com base em 3 componentes principais, explicando até um 66 % da variabilidade do conjunto de dados. Os valores deste índice permitiram classificar em uma escala relativa aos pantanais desde

os mais próximos aos ecossistemas de referência na zona até os mais afastados destes. **Conclusões.** A agrupação dos pantanais diretamente impactados pela mineração de aluvião permitiu identificar três grupos de acordo com sua proximidade aos de referência da zona em quanto às variáveis avaliadas: afastados, intermédios e próximos. Com base nesta agrupação se propõe enfocar as atividades de manejo da seguinte maneira: conservação no grupo mais próximo aos de referência, atividades de restauração no grupo mais afastados destes e atividades mistas no grupo intermédio.

Palavras chave: gestão ambiental, manejo de pantanais, análise de componente principais, engenharia ecológica.

INTRODUCCIÓN

La minería ha sido tradicionalmente vista como una de las actividades económicas responsable por el deterioro de la calidad ambiental y de la destrucción de muchos de los ecosistemas de humedal en Colombia (Ministerio del Medio Ambiente, 2001) y el mundo (Rooney, Bayley & Schindler, 2012; Gao, 2016). Sin embargo, en algunos casos, la re-configuración hidrogeomorfológica de las explotaciones mineras puede ser también el origen de ecosistemas artificiales con el potencial de imitar el funcionamiento de los humedales naturales (McKinstry & Anderson, 2002; Santoul, Figueroa & Green, 2004; De De Klerk, Oberholster, Van Wyk, Truter, Schaefer, & Botha, 2016). Estos humedales artificiales son el producto de lagunas creadas para el abastecimiento de agua en el proceso minero o son el resultado de excavaciones abandonadas, las cuales, luego de un proceso natural de sedimentación, exhiben condiciones físicas propicias para el desarrollo de procesos y funciones típicas de ecosistemas de humedal. Desde comienzos

del siglo XXI, el interés por restaurar las funciones de los ecosistemas en general en sitios degradados por la minería se ha incrementado, incluyendo aquellas funciones que provienen de los sitios abandonados con el potencial de funcionar como humedales (Castro & Moore, 2000; Bradshaw & Hüttl, 2001; Shackelford, Hobbs, Burgar, Erickson, Fontaine, Laliberté, Standish, 2013; Palmer & Hondula, 2014; Timoney, 2015).

En el valle aluvial del río Nechí, en el norte de Colombia, una operación de minería aluvial de oro, realizada mediante dragado mecánico, ha venido creando desde hace aproximadamente 60 años, una serie de humedales artificiales (35 a la fecha de realización de este estudio) que representan una extensión agregada de por lo menos 190 ha (Villa, 2003). Estos humedales, así como otros de origen natural hacen parte de un programa de manejo de humedales (PMH) liderado por la empresa responsable del proyecto minero. Este programa que se realiza en coordinación con la Corporación Autónoma Regional en jurisdicción (Corantioquia) contempla, entre otros,

el fortalecimiento de las actividades de recuperación de las zonas abandonadas por la minería, con énfasis en los ecosistemas artificiales de humedal y el desarrollo, en ellos, de proyectos productivos comunitarios.

En general, los humedales de la planicie aluvial del río Nechí se encuentran sujetos a presiones como la reclamación de tierras, la modificación completa de los regímenes hidráulicos, la contaminación, la canalización, la urbanización, la remoción de sedimentos o vegetación, y la sobreexplotación de recursos biológicos. Según el Ministerio del Medio Ambiente (2001), estos factores representan procesos de afectación severa a los ecosistemas de humedal o, incluso, su transformación total. Bajo este contexto, son imperativas las iniciativas como la del PMH mencionado y las actividades contempladas en este, ya que tienen como meta principal la mitigación de los impactos negativos en los ecosistemas de humedal de la zona (artificiales y naturales).

A pesar de que el PMH ya ha venido implementando algunas actividades específicas como la introducción de fauna y flora nativa o la promoción de proyectos piscícolas con especies nativas, sus resultados y su alcance han estado limitados por la falta de un criterio técnico-científico a la hora de la selección de los humedales en los cuales se implementan dichas acciones. Este criterio es importante ya que los humedales se encuentran en diferentes estados, producto de las diferentes trayectorias ecológicas que los han caracterizado y esto ha hecho que las acciones de manejo que se han implementado no produzcan los mismos resultados para todos los humedales en el programa. Las acciones de manejo a implementar deben ser una respuesta al estado o al nivel de degradación del sitio que se quiere intervenir, siendo las actividades de conservación las que deben predominar cuando el estado es óptimo en términos de las funciones ecológicas que ofrece el humedal, o es cercano a este (Linding-Cisneros & Zambrano, 2007; Gutrich, Taylor & Fennessy, 2009). Por el contrario, las acciones de restauración son las que deben predominar cuando el estado es más alejado de este óptimo.

En la práctica, el estado de un humedal se establece mediante una valoración de las funciones del sitio y de su condición o integridad ecológica (Thiesing, 2001). En Colombia, el método oficial para realizar esta valoración consiste en un proceso en el cual se evalúan cualitativamente las características que resultan importantes para la planificación del manejo de los humedales. A pesar de su validez en procesos de planeación a grandes escalas, por su naturaleza,

este procedimiento de evaluación cualitativa no es explícito en cuanto a cuáles son los humedales que se deben intervenir y cuáles deben ser los objetivos específicos de estas intervenciones, limitando su aplicación en PMH locales como el que se desarrolla en el valle aluvial del río Nechí.

Por esta razón, este trabajo tuvo como objetivo la formulación de un método para la clasificación de los ecosistemas de humedal y su aplicación a un caso en el valle aluvial del Río Nechí como sustento en la toma de decisiones en un PMH que se adelanta en esta zona. La metodología desarrollada se basa en la determinación de 7 variables en el componente físico, fisicoquímico y biológico de los humedales artificiales creados por el actual sistema de explotación, y de los humedales naturales que conforman el programa de manejo. Con base en los valores de las 7 variables para cada humedal y un posterior análisis de componentes principales se calculó un índice de clasificación, el cual sirvió para identificar los humedales en una escala relativa. Las implicaciones que tiene esta clasificación en la implementación del PMH que se adelanta en el Valle Aluvial del río Nechí son discutidas, así como las implicaciones de la aplicación de este método de clasificación de humedales en otros paisajes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El valle aluvial del río Nechí se localiza en el norte de Colombia (figura 1). El valle presenta alturas que oscilan entre los 80 y 150 msnm, con promedios multianuales de temperatura, humedad relativa y precipitación de 28 °C, 80 % y 4400 mm, respectivamente (Villa & Tobón, 2008). Este valle ha sido explotado por la minería de oro artesanal desde el período prehispánico, pero desde mediados del siglo XX la mayor parte del oro ha sido producida por grandes dragas de excavación mecánicas que funcionan con energía eléctrica (West, 1952) (figura 2). De acuerdo con el plan de extracción, algunas de las lagunas de flotación utilizadas por las dragas para su operación, lagunas que luego son abandonadas, quedan conectadas con el río principal o con uno de sus brazos. Luego de un proceso natural de sedimentación y la consecuente reducción en la profundidad, un proceso de auto-restauración toma lugar, y estos cuerpos de agua comienzan a ofrecer algunas funciones y servicios característicos de los ecosistemas de humedal naturales, remanentes de la zona (Villa & Tobón, 2012).

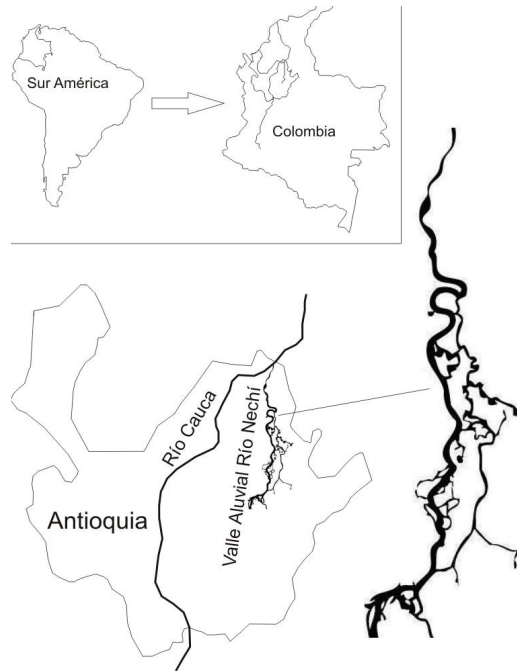


Figura 1. Ubicación general del sitio de estudio (editada de Villa & Tobón (2012) con permiso del editor).

Fuente: Villa & Tobón (2012) con permiso del editor eliminar el titulo al igual que la figura siguiente

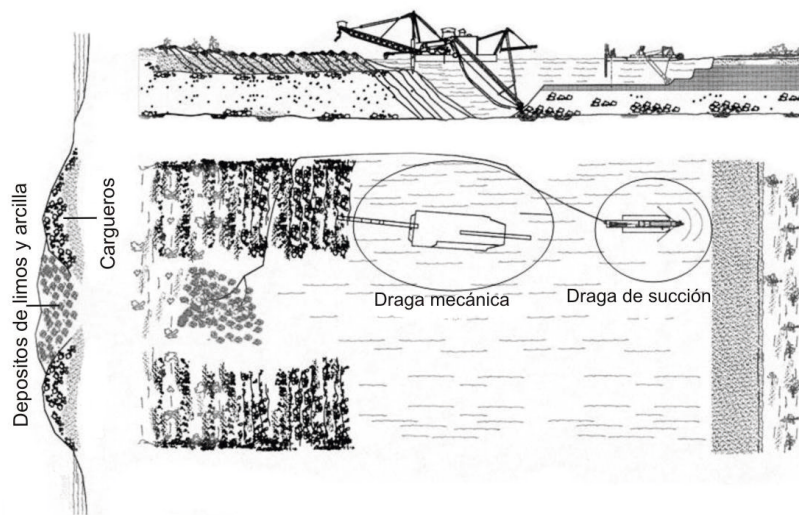


Figura 2. Diagrama en perfil y planta en el cual se ilustra el sistema general de extracción del aluvión por medio de las dragas (editada de Villa & Tobón (2012) con permiso del editor).

En la actualidad, los cargueros son perfilados con maquinaria pesada para suavizar las pendientes y son plantados con especies nativas como parte de las actividades de mitigación. Sin embargo, esta práctica es relativamente reciente, y los cargueros de los humedales, que fueron creados hace más de 40 años, no fueron perfilados, y algunos fueron plantados con especies exóticas de rápido crecimiento como la *Acacia mangium*. Otros, en cambio, fueron utilizados desde su creación para actividades agrícolas por los pobladores de la zona interrumpiendo o modificando la conexión con el río o, en el caso de los humedales de más edad, fueron abandonados permitiendo procesos de regeneración natural en los alrededores. Esta diferencia en el manejo ha dado como resultado diferentes trayectorias ecológicas, las cuales en la actualidad se ven reflejadas en los diferentes estados ecológicos que exhiben cada uno de los humedales en las zonas de explotación y abandono.

Para este estudio se consideraron 35 humedales creados o reconfigurados por la extracción aluvial descrita, y 6 humedales adicionales que no han sido sujetos a la minería aluvial descrita, como ecosistemas de referencia en la zona.

Variables

Las variables utilizadas para la generación del índice corresponden a 7 variables medidas o calculadas

para los 41 humedales estudiados. Las variables seleccionadas son indicadores de funcionamiento y / o presión en los humedales (Brinson, 1993). Su selección se hizo por medio de un consenso *ad hoc* de un equipo multidisciplinario de profesionales con experiencia en el estudio y manejo de los humedales que componen el PMH del valle aluvial del río Nechí. El equipo profesional estuvo integrado por 3 biólogos, 1 ingeniero ambiental, 1 ingeniero agrónomo y 1 ingeniero civil, que pertenecían al sector oficial (autoridad ambiental) y al sector privado (empresa ejecutora del programa y consultores independientes). Las variables fueron seleccionadas a partir de una revisión de variables indicadoras utilizadas en metodologías reconocidas para la clasificación de humedales (e. g., sólidos totales disueltos y riqueza de planta acuáticas y semiacuáticas) (Cowardin, Carter, Golet & LaRoe, 1979; Adamus, 1989; Breaux, Cochrane, Evens, Martindale, Pavlik, Suer & Benner, 2005). También se incluyeron otras, que son propias del contexto minero de la zona como el mercurio en sedimentos (tabla 1). Para la medición de las variables se utilizó información secundaria proveniente del sistema de gestión ambiental de la empresa responsable del proyecto minero (variables físicas), así como información en campo (demás variables), la cual fue recolectada entre julio y agosto de 2008, a mediados del período de lluvias, que usualmente ocurre entre marzo y noviembre.

Tabla 1. Variables seleccionadas para la identificación de los humedales indicando las unidades y la fuente, método o equipo utilizado para su determinación.

Componente	VARIABLES	UNIDADES	FUENTE / MÉTODO / EQUIPO
Físico	Índice de desarrollo de costa (IDC)	Adimensional	Cartografía
	Área del humedal (AI)	Ha	Cartografía
	Longitud del canal de conexión (Lc)	m	Cartografía
Físicoquímico	Sólidos totales Disueltos (STD)	mg/L	Conductímetro YSI 300EC
	Mercurio en sedimentos (HgS)	µg/L	Vapor frío
Biológico	Riqueza de planta acuáticas y semiacuáticas (Va)	Número de especies	Observación directa y/o indentificación en herbario
	Riqueza de aves asociadas al humedal (Aves)	Número de especies	Observación directa

Índice de identificación de humedales

El índice de identificación de humedales se generó a partir de un análisis de componentes principales (ACP) de las 7 variables en los 41 humedales que hicieron parte del estudio. Una vez realizado este análisis, se seleccionaron los componentes principales (PC) con valor superior a 1. Con los pesos resultantes de las 7 variables en cada uno de los componentes principales, se conformaron ecuaciones lineales para cada componente:

$$PC_i = f(IDC, AI, Lc, SST, HgS, Va, Aves) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Luego, los valores que fueron medidos para cada variable en cada humedal se reemplazaron en cada una de las ecuaciones lineales que fueron creadas y los valores se sumaron para generar el índice de clasificación (IC):

$$IC = \sum_{i=1}^n x_i PC_i \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde x_i es un factor de ponderación normalizado de la varianza explicada por cada componente. Luego, los valores de los índices se normalizaron nuevamente entre 0 y 1. Esto permitió la generación de un puntaje relativo, siendo los valores más cercanos a 1 los que representaban ecosistemas con mayor grado de intervención o más alejados de los ecosistemas de referencia. Utilizando el rango intercuartil de la distribución de los IC, se conformaron tres grupos de humedales: 1) alejados de la referencia de la zona (i. e. por debajo del intervalo), 2) intermedio (i. e. rango entre el primer y tercer cuartil) y 3) cercanos a la referencia de la zona (i. e. por encima del tercer cuartil).

RESULTADOS

Análisis de componentes principales

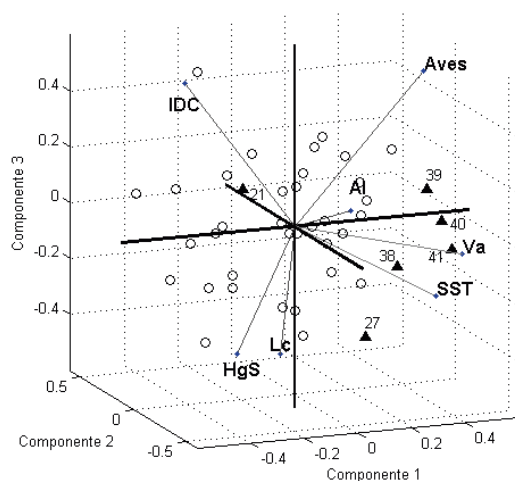
De los 7 componentes principales generados en el ACP, 3 presentaron un valor superior a 1 (tabla 2). El porcentaje de explicación de la variabilidad de los datos fue de 28,2, 23,5 y 16,2 % en estos tres primeros componentes, respectivamente, para una explicación acumulada de 68 %.

Tabla 2. Características de los componentes principales utilizados en la conformación del índice. IDC = Índice de desarrollo de costa; AI = área del humedal; Lc = longitud del canal de conexión; SST = sólidos suspendidos totales; HgS = mercurio en sedimentos; Va = riqueza de plantas acuáticas y semiacuáticas; Aves = riqueza de aves.

	Componentes principales		
	1	2	3
<i>Eigenvalue</i>	1,91	1,57	1,15
<i>Porporción de la varianza (%)</i>	28,2	23,5	16,2
<i>Explicación acumulada (%)</i>	28,2	51,7	67,9
Variables	Pesos		
<i>IDC</i>	0,183	-0,570	0,396
<i>AI</i>	-0,382	-0,444	-0,080
<i>Lc</i>	-0,112	-0,422	-0,563
<i>SST</i>	-0,427	0,255	-0,228
<i>HgS</i>	0,370	0,397	-0,331
<i>Va</i>	-0,590	0,088	-0,132
<i>Aves</i>	-0,375	0,263	0,584

El primer componente asignó los pesos más altos en la escala positiva a la riqueza de plantas acuáticas y semiacuáticas y en la escala negativa al mercurio en los sedimentos. Esto significa que para este componente la mejor separación entre los estados ecológicos de los humedales se obtiene de contrastar estas dos variables (figura 3). El segundo componente, en cambio, asignó un alto peso en la escala negativa a las variables físicas, contrastándolas con las otras variables fisicoquímicas y biológicas. El tercer componente contrasta la riqueza de aves con la longitud del canal principalmente para discriminar los estados ecológicos de los humedales.

Figura 3. Biplot en tres dimensiones de los tres primeros componentes principales contruidos a partir de los valores de las 7 variables consideradas en el estudio (IDC = Índice de desarrollo de costa; AI = área del humedal; Lc = longitud del canal de conexión; SST = sólidos suspendidos totales; HgS = mercurio en sedimentos; Va = riqueza de plantas acuáticas y semiacuáticas; Aves = riqueza de aves.). Los humedales de referencia de la zona están representados con triángulos y sus correspondientes números de identificación dentro del plan de manejo.



Clasificación de los humedales

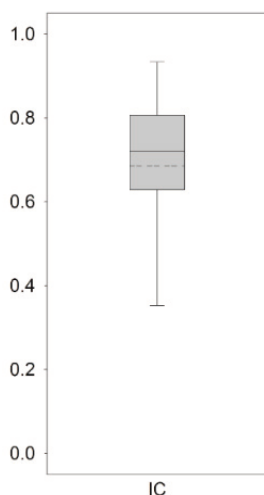
En la tabla 3 se presentan los humedales agrupados de acuerdo con el IC. La mediana del IC fue 0,72 y el

rango intercuartil fue (0,63 – 0,80) (figura 4). En este grupo intermedio se clasificaron 21 sitios, mientras que en el grupo de los más alejados de la referencia de la zona se clasificaron 10 sitios. Otros 10 se clasificaron en los cercanos a la referencia de la zona. De 6 humedales naturales considerados dentro del estudio, dos fueron clasificados dentro del grupo de estados intermedios.

Tabla 3. Agrupación de los humedales creados y naturales en la zona de explotación aluvial de oro del valle aluvial del Río Nechí según el índice de clasificación (IC). Los números de los humedales corresponden a los códigos otorgados dentro del plan de manejo de humedales. (*) Indica humedales naturales remanentes evaluados dentro el estudio como de referencia de la zona.

Alejados al óptimo ecológico		Intermedios		Cercanos óptimo ecológico	
Humedal	IC	Humedal	IC	Humedal	IC
2	0,00	28	0,63	12	0,81
15	0,05	5	0,65	8	0,83
3	0,25	29	0,65	21*	0,84
1	0,33	37	0,65	40*	0,84
10	0,42	38*	0,65	25	0,85
32	0,48	24	0,69	19	0,87
18	0,53	16	0,70	26	0,95
36	0,61	31	0,71	39*	0,97
30	0,62	23	0,71	41*	1,00
35	0,63	11	0,72	33	1,00
		6	0,72		
		9	0,73		
		14	0,74		
		17	0,75		
		34	0,75		
		27*	0,76		
		4	0,76		
		7	0,79		
		22	0,80		
		20	0,80		
		13	0,80		

Figura 4. Gráfica de cajones “boxplot” del índice de clasificación. La línea negra corresponde a la mediana y la punteada a la media. Los extremos superiores e inferiores del cajón representan el tercer y primer cuartil, respectivamente. Las barras de error abajo y arriba representan el décimo y noventa percentil respectivamente.



DISCUSIÓN

Índice de clasificación (IC)

En general, los humedales naturales remanentes son los que presentan los valores más elevados en el IC (grupo 3). En este grupo se encuentran algunos humedales artificiales con valores incluso mayores que los de algunos naturales (tabla 4). Estos resultados se deben al efecto combinado de los impactos ambientales a los que se han sido sometidos los humedales naturales de la zona de estudio. Esto, como consecuencia de las operaciones mineras informales (artesanales y en algunos casos mecanizadas) o de las actividades ganaderas, las cuales se ejercen sin ningún control en la mayoría de los casos; por otro lado, por los valores relativamente altos de algunas de las variables de los humedales artificiales, los cuales exhibieron valores similares a los humedales naturales en algunas de las variables más importantes de los componentes principales (e.g. longitud de canal o riqueza).

En Colombia, el Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) por medio de la Resolución 196 de 2006: “Guía Técnica para la Formulación de Planes de Manejo para Humedales en Colombia”, establece, como método oficial para la evaluación del estado de estos ecosistemas, una descripción basada en algunas características que resultan importantes en el proceso de caracterización para el diseño de los planes de manejo. Estas características se evalúan de acuerdo con la guía del MAVDT, mediante la descripción cualitativa de una serie de parámetros en diferentes ámbitos (ecológico, socio-cultural y problemática ambiental). Este método de carácter cualitativo no permite identificar de una forma cuantitativa el estado de los humedales, limitando su aplicación como una herramienta en la toma de decisiones a la hora de diseñar planes de manejo. Existen, sin embargo, al nivel mundial, otros métodos para la valoración de humedales que son de carácter cuantitativo (Thiesing, 2001). Los de más amplio reconocimiento y utilización en la gestión de los ecosistemas de humedal en Colombia son aquellos que se basan en el uso de bioindicadores (Roldán-Pérez, 1999; Londoño, 2003; Gutierrez, Riss & Ospina, 2005). Estos métodos, a pesar de que ofrecen ventajas comparativas frente al método que se establece en la Guía del MAVDT que permiten el cálculo de índices numéricos de la calidad del ecosistema, no permiten la integración directa de otras variables que son externas al sistema acuático bajo análisis, pero que también tienen influencia en la integridad ecológica de los humedales (p. e. el uso de la tierra en los alrededores de los humedales o la riqueza de plantas acuáticas o aves). Bajo estas consideraciones, el método para la clasificación que se presenta en este estudio resulta una alternativa que permite, en una primera instancia, sortear la subjetividad que se puede presentar en la valoración que se propone en la guía del MAVDT. Además, permite la integración de las variables limnológicas consideradas en los métodos basados en la bioindicación y de otras variables que son de interés en el manejo de los humedales.

Es importante señalar que el IC es un método para clasificar de manera relativa los humedales en cuanto al valor combinado de las variables consideradas en el análisis. La clasificación se hace con relación a los humedales que exhiben un estado ecológico óptimo o cercano a este, los cuales están representados por los humedales naturales en la zona. En este sentido, el IC no está diseñado para una valoración del estado ecológico de los humedales, a pesar de que el método presenta las características generales de los métodos utilizados para tal fin (Breux *et al.*, 2005). No se debe

descartar, para el caso de los humedales en el valle del río Nechí, la posibilidad de que a partir de posteriores estudios sobre la relación del IC con las funciones de los humedales (inéditos a la fecha en la cual se realizó este estudio), se pueda establecer hacia el futuro su aplicación como sistema para la valoración rápida de su estado ecológico.

También, para la interpretación del IC se debe tener en cuenta que el resultado de la clasificación es limitado en la identificación de la dinámica de los procesos que determinan los valores de las variables, es decir, de su variación en el tiempo. Esto se debe a que en la generación del índice se utilizaron medidas discretas, que corresponden al período de lluvias en la región, y no considera los valores en períodos climáticos secos o de transición.

Implicaciones para el programa de manejo de humedales

En un escenario ideal, todas las acciones que se implementen dentro del programa de manejo deberían llevar a todos los humedales a tener valores del IC similares a los humedales de referencia. Sin embargo, en la práctica tal meta no es viable, debido a los diferentes estados ecológicos de los humedales y a que los recursos (monetarios o de personal) son limitados. Por consiguiente, el criterio para la clasificación de los humedales con base en el valor medio del IC y su rango intercuartil es una forma simplificada para la interpretación de los resultados. Esta permitió diferenciar de manera práctica tres grupos de humedales, sobre los cuales se pueden dirigir acciones discriminadas que minimicen el uso de recursos mientras maximicen la efectividad.

De esta manera, las actividades de conservación contempladas en el programa de manejo de humedales deberían estar enfocadas a los humedales que conforman el grupo más cercano a los humedales naturales remanentes de referencia de la zona (Linding-Cisneros & Zambrano, 2007). Igualmente, las actividades dirigidas a la restauración deberían estar enfocadas a los humedales del grupo más alejado de estos de referencia (IC por debajo del rango intercuartil), mientras que actividades que contemplen múltiples objetivos, como la piscicultura, pueden estar dirigidas a los humedales que conforman el grupo con los valores intermedios de IC.

También en el diseño e implementación del programa de manejo de humedales, la clasificación por grupos y los valores específicos del IC para cada humedal

pueden servir para establecer objetivos específicos para cada uno de los grupos de humedales o un humedal particular. Por ejemplo, los responsables del PMH podrían dirigir más recursos (económicos, tecnológicos o de personal) a los humedales que presentan los valores más bajos del IC dentro de este grupo. La meta puede ser aumentar el índice en un tanto por ciento (%), y el éxito de la implementación de las actividades se podría valorar mediante remediciones del IC durante un determinado tiempo. Estas remediciones del IC pueden ser la base de un programa de monitorización que permita evaluar las diferentes acciones implementadas dentro del marco del PMH (restauración, conservación o mixtas) y establecer sobre la aplicación, las medidas correctivas del caso en un esquema de manejo adaptativo (Schulte-Hostedde, Walters, Powell & Shrubsole, 2007).

Es importante señalar que el IC también es flexible en términos de su aplicación, ya que no se limita a los 41 humedales con los cuales se hizo este estudio. En el caso de que se hiciera necesaria la inclusión de otro humedal en el PMH (natural o artificial), el procedimiento para su clasificación sería el mismo que se siguió con cada uno de los humedales: medición de variables, reemplazo de los valores en las ecuaciones lineales de cada componente y suma ponderada de los componentes. Finalmente, la metodología general puede seguirse para la clasificación de humedales en otros paisajes diferentes a los de las zonas explotadas por minería aluvial, sin importar su origen. Para esto, el procedimiento de conformación del índice sería el mismo, pero la determinación de las variables a partir de las cuales este se construye dependería del paisaje en el cual están inmersos los humedales a clasificar y / o de los objetivos de los proyectos de manejo o intervención.

CONCLUSIONES

El método desarrollado permitió la generación de un índice de clasificación de humedales a partir de una serie de variables que son indicadoras del funcionamiento y / o de las presiones sobre estos ecosistemas. El índice permite la clasificación de los humedales con relación a un óptimo ecológico que está dado, según la metodología por la inclusión de humedales naturales o humedales de referencia.

En el caso específico del PMH del valle aluvial del río Nechí, la metodología implementada para la clasificación de los humedales permitió generar un

índice a partir de las combinaciones lineales de 3 componentes principales, explicando hasta un 67 % de la variabilidad de los datos. La agrupación de los humedales con base en los valores del IC permitió identificar 3 grupos. Los grupos varían en cuanto a su conformación, entre humedales más cercanos a los de referencia en la zona, hasta los más alejados de estos. Con base en estas agrupaciones se propone de manera general planear las intervenciones del pmh del valle aluvial del río Nechí, de la siguiente forma: actividades de conservación en el grupo más cercano a los de referencia, actividades de restauración en el grupo más alejado a estos de referencia y actividades mixtas en el grupo intermedio.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la División del Medio Ambiente de la empresa Mineros S.A., que mediante contrato 757 de 2008 hizo posible la realización del trabajo de campo y posterior estudio que dio origen a este artículo. Igualmente, a los biólogos Luz Adriana Morales y José Andrés Posada, de la firma Hidroasesores Ltda., quienes coordinaron y ejecutaron el trabajo de campo necesario para la determinación de las variables físico-químicas y biológicas que se utilizaron en este estudio.

REFERENCIAS

- Adamus, P. (1989). *Wetlands and Water Quality: EPA's Research and Monitoring Implementation Plan for the Years 1989-1994*. Corvallis, Oregon: USEPA Environmental Research Lab.
- Bradshaw, A. & Hüttl, R. (2001). Future minesite restoration involves a broader approach. *Ecological engineering*, 87–90.
- Breaux, A.; Cochrane, S.; Evens, J.; Martindale, M.; Pavlik, B.; Suer, L. & Benner, D. (2005). Wetland ecological and compliance assessments in the San Francisco Bay Region, California, USA. *Journal of Environmental Management*, 74(3), 217–237. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.08.017>
- Brinson, M. (1993). *A hydrogeomorphic classification for wetlands* (p. 103). Washington, DC: US Army Corps of Engineers.
- Castro, J. & Moore, J. (2000). Pit lakes: their characteristics and the potential for their remediation. *Environmental geology*, 39(11), 1254–1260.
- Cowardin, L.; Carter, V.; Golet, F., & LaRoe, E. (1979). *Classification of the wetlands and deepwater habitats of the United States* (p. 103). Washington.
- De Klerk, A.; Oberholster, P.; Van Wyk, J.; Truter, J.; Schaefer, L. & Botha, A. (2016). The effect of rehabilitation measures on ecological infrastructure in response to acid mine drainage from coal mining. *Ecological Engineering*, 95, 463–474. <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2016.06.070>
- Gao, J. (2016). Wetland and Its Degradation in the Yellow River Source Zone. En G. J. Brierley, X. Li, C. Cullum, & J. Gao (Eds.), *Landscape and Ecosystem Diversity, Dynamics and Management in the Yellow River Source Zone* (pp. 209–232). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30475-5_10
- Gutierrez, J.; Riss, W. & Ospina, R. (2005). Bioindicación de la calidad del agua con macroinvertebrados acuáticos en la sabana de Bogotá, utilizando redes neuronales artificiales. *Caldasia*, 26(1), 151–160.
- Gutrich, J.; Taylor, K. J. & Fennessy, M. (2009). Restoration of vegetation communities of created depressional marshes in Ohio and Colorado (USA): The importance of initial effort for mitigation success. *Ecological Engineering*, 35, 351–368.
- Linding-Cisneros, R. & Zambrano, L. (2007). Aplicaciones prácticas para la conservación y restauración de humedales costeros y otros ecosistemas acuáticos. En O. Sánchez, M. Herzig, E. Peters, R. Márquez, & L. Zambrano (Eds.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México* (pp. 167–188). México D. F.: Impresora y Encuadernadora Progreso.
- Londoño, J. C. (2003). Estructura de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos asociados a macrofitas flotantes y su relación con la calidad del agua en la ciénaga Colombia. Cauca, Antioquia. *Revista Ingenierías*, 3, 105–120.
- McKinstry, M. & Anderson, S. H. (2002). Creating wetlands for waterfowl in Wyoming. *Ecological Engineering*, 18, 293–304.

- Ministerio del Medio Ambiente. (2001). *Política Nacional Para Humedales Interiores de Colombia* (p. 41).
- Palmer, M. & Hondula, K. (2014). Restoration as Mitigation: Analysis of Stream Mitigation for Coal Mining Impacts in Southern Appalachia. *Environmental Science & Technology*, 48(18), 10552–10560. <https://doi.org/10.1021/es503052f>
- Roldán-Pérez, G. (1999). Los Macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 23(88), 375–387.
- Rooney, R.; Bayley, E. & Schindler, D. W. (2012). Oil sands mining and reclamation cause massive loss of peatland and stored carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(13), 4933–4937.
- Santoul, F., Figueroa, J. & Green, J. (2004). Importance of gravel pits for the conservation of waterbirds in the Garonne river floodplain (southwest France). *Biodiversity and Conservation*, 12, 1231–1243.
- Schulte-Hostedde, B.; Walters, D.; Powell, C. & Shrubsole, D. (2007). Wetland management: An analysis of past practice and recent policy changes in Ontario. *Journal of Environmental Management*, 82, 83–94.
- Shackelford, N.; Hobbs, R., Burgar, J.; Erickson, T.; Fontaine, J.; Laliberté, E. & Standish, R. (2013). Primed for Change: Developing Ecological Restoration for the 21st Century. *Restoration Ecology*, 21(3), 297–304. <https://doi.org/10.1111/rec.12012>
- Thiesing, M. (2001). An evaluation of wetland assessment techniques and their applications to decision making. En C. M. Finlayson, N. C. Davidson, & N. J. Stevenson (Eds.), *Second International Conference on Wetlands and Sustainable Development*. (pp. 87–96). Dakar, Senegal: Supervising Scientist.
- Timoney, K. (2015). The Role of Regulations and Policy in Wetland Loss and Attempts at Reclamation. En *Impaired Wetlands in a Damaged Landscape* (pp. 119–125). Springer International Publishing. Recuperado a partir de http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10235-1_9
- Villa, J. (2003). *Propuesta metodológica para la elaboración de un proyecto de restauración de humedales y su aplicación a un caso particular de zonas explotadas por minería de dragado*. Envigado: Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- Villa, J. & Tobón, C. (2012). Modeling hydrologic dynamics of a created wetland, Colombia. *Ecological Engineering*, 40(0), 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.005>
- Villa, J. & Tobón, C. (2008). Modelación de la dinámica hídrica de un humedal creado en la explotación de oro por dragado en el valle aluvial del río Nechí. *Revista Facultad de Nacional de Agronomía*, 61 (suplemento), 22–23.
- West, R. (1952). Folk mining in Colombia. *Economic geography*, 28(4), 323–330.