



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Valoración económica de humedales

Casos Capellanía y La Conejera
en Bogotá

Editora

Tatiana Gélvez Rubio

COLECCIÓN **INVESTIGACIÓN**



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Catalogación en la Publicación Fundación Universitaria Los Libertadores

Valoración económica de humedales: casos Capellanía y La Conejera en Bogotá / editora Tatiana Gélvez Rubio; autores Heine Rafael Gutiérrez Delgado... [y otros seis]. – Bogotá: Fundación Universitaria Los Libertadores, 2018.

226 páginas: ilustraciones, fotografías, diagramas; 17x24 cm (Colección investigación)

ISBN 978-958-5478-09-1 (impreso)

ISBN 978-958-5478-10-7 (digital)

1. Conservación de los recursos naturales -- Aspectos económicos -- Bogotá (Colombia) 2. Conservación de humedales -- Aspectos económicos -- Bogotá (Colombia) 3. Calidad del agua -- Investigaciones -- Bogotá (Colombia) 4. Técnica de valoración ambiental -- Investigaciones -- Bogotá (Colombia) I. Gélvez Rubio, Tatiana, autora, editora II. Gutiérrez Delgado, Heine Rafael, autor III. Hurtado Moreno, Ángela Patricia, autora IV. Lombana Charfuelán, Oscar Libardo, autor V. Robles Rosselló, Antonio, autor VI. Upegui Pachón, Angie, autora VII. Villamil Mora, Guillermo, autor VIII. Fundación Universitaria Los Libertadores

333.918 –dc23

CRAIFULL

Primera edición: Bogotá, noviembre de 2018

© Fundación Universitaria Los Libertadores
Bogotá, D.C., Colombia.

Cra. 16 No. 63A-68 / Tel.: 254 47 50
www.ulibertadores.edu.co

Juán Manuel Linares Venegas
Presidente del Claustro

Ricardo Santamaría Salamanca
Rector

María Angélica Cortés Montejo
Vicerrectora General

Luis Ignacio Aguilar Zambrano
Vicerrector de Investigación

© *Tatiana Andrea Gélvez Rubio*
Heine Rafael Gutiérrez Delgado
Ángela Patricia Hurtado Moreno
Óscar Libardo Lombana Charfuelán
Antonio Robles Rosselló
Angie Upegui Pachón
Guillermo Villamil Mora
Autores

Laura Rodríguez Mejía
Corrección de estilo

Precolombi EU, David Reyes
Diagramación

Diego A. Martínez Cárdenas
Coordinador Editorial

Los autores declaran que esta investigación fue financiada por la Fundación Universitaria Los Libertadores en el marco de la Convocatoria de Investigaciones internas de la institución.

Los conceptos emitidos en esta publicación son responsabilidad expresa de sus autores y no comprometen de ninguna forma a la Institución. Se autoriza la reproducción del texto citando autor y fuente, únicamente con fines académicos. En caso distinto, se requiere solicitar autorización por escrito al editor.

Contenido

Agradecimientos	15
Prólogo	17
Abreviaciones	19
PRIMERA PARTE	
METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN	
Introducción. Valoración económica de humedales	23
<i>Tatiana Gélvez Rubio</i>	
Generalidades de los humedales naturales (HN)	25
UD y UI en Capellanía y La Conejera	27
Organización del libro	28
Referencias	30
Capítulo 1. Métodos de valoración de servicios ecosistémicos	31
<i>Angie Upegui & Antonio Robles Rosselló</i>	
Valoración económica total (VET)	32
Método de Valoración Contingente (MVC)	35
Método de costos de viaje (MV)	37
Método de precios hedónicos (MH)	38
Otros métodos	39
Conclusiones	40
Referencias bibliográficas	41
Capítulo 2. Formulación y análisis de la percepción comunitaria en dos humedales del Distrito Capital	43
<i>Ángela P. Hurtado-Moreno</i>	
Diseño de la encuesta	44
Conclusiones	48
Referencias	49
Anexo 1. Formato único de encuestas	51

Capítulo 3.	Métodos de valoración de calidad de suelos, agua y aire	55
	<i>Oscar Lombana Charfuelán</i>	
	Parámetros de análisis en suelos	55
	Análisis físico-químico de suelos	57
	Índices de calidad del suelo	61
	Parámetros de análisis en agua	64
	Índice de calidad del agua	66
	Parámetros para el análisis de la calidad del aire	69
	Índice de calidad del aire	70
	Referencias	74
	Anexo 1. Parámetros de clasificación de la calidad de los diferentes índices fisicoquímicos de la calidad del agua	77

SEGUNDA PARTE

HUMEDALES CAPELLANÍA Y LA CONEJERA

Capítulo 4.	Antecedentes históricos y amenazas a los ecosistemas de humedal	83
	<i>Guillermo Villamil Mora</i>	
	Cambios históricos del territorio	85
	Eras geológicas y el origen de los humedales de la Sabana	85
	Transformaciones urbanas y los humedales	86
	Transformaciones del territorio y capacidad de embalse	90
	Análisis: humedales La Conejera y Capellanía (1972-2013)	93
	Análisis de riesgo de inundación	98
	Conclusiones	101
	Recomendaciones	102
	Referencias	103
Capítulo 5.	Marco institucional y valoración contingente en los PEDH Capellanía y La Conejera	105
	<i>Tatiana Gélvez Rubio y Ángela P. Hurtado-Moreno</i>	
	Marco institucional de la administración de los humedales en Bogotá	106
	Humedales Capellanía y La Conejera	108
	Percepción comunitaria	112
	Relación de residentes con el humedal	116

Valoración contingente y disposición a pagar	124
Conclusiones	126
Referencias	127
Capítulo 6. Calidad de suelo, aire y agua en Capellanía y La Conejera	129
<i>Óscar Lombana Charfuelán</i>	
Análisis de la calidad del suelo	129
Humedal La Conejera	130
Humedal Capellanía	134
Resultados relevantes del análisis de suelo en los humedales Capellanía y La Conejera	142
Análisis de calidad del agua	142
Medición	142
Resultados	145
Análisis de calidad del aire	151
Medición	151
Resultados	159
Referencias	169
Anexo 1. Muestras de agua humedal Capellanía	170
Anexo 2. Muestras de agua humedal La Conejera	
Anexo 3. Parámetros determinados en humedal Capellanía y su correspondencia de acuerdo con los artículos 38 y 45 del decreto 1594 de 1984	174
Anexo 4. Parámetros determinados en humedal La Conejera de acuerdo con los artículos 38 y 45 del decreto 1594 de 1984	176
Anexo 5. Valoración cualitativa principales parámetros físicoquímicos determinados – Capellanía	178
Anexo 6. Valoración cualitativa principales parámetros físicoquímicos determinados – La Conejera	179
Anexo 7. Resultados parámetros analizados muestras de suelo humedal La Conejera	180
Capítulo 7. Avifauna en Capellanía y La Conejera: especies amenazadas y funcionalidad	181
<i>Rafael Gutiérrez</i>	
Metodología	183
Resultados	184
Análisis de resultados	188

Conclusiones	189
Referencias	191
Anexo 1. Lista de especies registradas en los humedales La Conejera y Capellanía	192
Capítulo 8. Relación entre vectores asociados a los humedales Capellanía y La Conejera, y las infecciones respiratorias agudas (IRA), enfermedad del aparato digestivo (EDA) y dermatitis	197
<i>Guillermo Villamil Mora</i>	
Vectores	198
Parásitos hospederos	199
Protozoos o protozoosis	200
Enfermedades más comunes	201
Infección respiratoria aguda (IRA)	201
Enfermedades de aparato digestivo y parásitos (EDA)	202
Enfermedades de la piel y tejido celular subcutáneo	203
Evidencia empírica	203
Conclusiones	209
Referencias	211
Anexo 1	212
Conclusiones	215
<i>Tatiana Gelvez Rubio</i>	
Inundaciones	215
Percepción comunitaria	216
Calidad de aire, suelos y agua	217
Aves	218
Enfermedades	219
Los autores	221

Índice de tablas y gráficos

Introducción. Valoración económica de humedales	23
Tabla 1. Categorías de humedales reconocidas por Ramsar	25
Tabla 2. Funciones de los humedales	26
Tabla 3. Funciones ambientales de los PEDH La Conejera y Capellanía	27
Capítulo 1. Métodos de valoración de servicios ecosistémicos	31
Figura 1. Condiciones de la VET	33
Figura 2. Metodologías de valoración de los BSA	34
Gráfico 1. Excedente del consumidor	36
Gráfico 2. Función de demanda por recreación	38
Capítulo 2. Formulación y análisis de la percepción comunitaria en dos humedales del Distrito Capital	43
Tabla 1. Valores de uso activo relacionados con regulación y existencia	45
Tabla 2. Valores de uso activo relacionadas con mantenimiento	46
Tabla 3. Valores de usos directos, culturales y recreacionales	47
Tabla 4. Relaciones con escenarios de cambio del humedal	48
Capítulo 3. Métodos de valoración de calidad de suelos, agua y aire	55
Tabla 1. Tipos de análisis de suelos	57
Tabla 2. Interpretación de resultados de análisis de suelos	58
Tabla 3. Niveles críticos de las relaciones catiónicas	60
Tabla 4. Clasificación de suelos afectados por sales	61
Tabla 5. Valores de referencia de metales pesados en diferentes regiones (mg/kg)	64
Tabla 6. Ecuaciones de cálculo empleadas para la determinación de ICA	67
Tabla 7. Índice de contaminación por mineralización (ICOMI)	68
Tabla 8. Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO)	68
Tabla 9. Índices de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS), por trofia (ICOTRO) y por pH (ICOPH)	68
Tabla 10. Escala del ICO según el grado de contaminación	69
Tabla 11. Puntos de corte para cada categoría de AQI	71

Tabla 12. Escala de colores de AQI y niveles para la salud	72
Tabla 13. Escala modificada para el cálculo de AQI de acuerdo con los estándares europeos	73
Capítulo 4. Antecedentes históricos y amenazas a los ecosistemas de humedal	83
Tabla 1. Ecosistemas de la Sabana al final del Heloceno	86
Figura 1. Planicie, inundación del Río Bogotá en el sector del humedal La Conejera (1952)	87
Figura 2. Humedal La Conejera, Bogotá (1998)	88
Tabla 2. Zonas funcionales de los PMA para humedales	90
Figura 3. Humedal La Conejera	91
Figura 4. Humedal Capellanía	92
Figura 5. Mapa cualitativo humedal Capellanía	93
Figura 6. Mapa cualitativo humedal La Conejera	94
Figura 7. Cambios en coberturas vegetales	96
Figura 8. Fotografía aérea de Suba, valle del río Bogotá - Humedal La Conejera	96
Figura 9. Mapa: riesgo de inundación humedal Capellanía	100
Figura 10. Mapa: riesgo de inundación humedal La Conejera	101
Capítulo 5. Marco institucional y valoración contingente en los PEDH Capellanía y La Conejera	105
Figura 1. Estructura administrativa del manejo de los humedales en Bogotá	108
Tabla 1. Índices calculados con población proyectada Suba y Fontibón	113
Tabla 2. Características de la población encuestada	113
Gráfica 1. Conocimiento que se tiene del humedal por lugar de residencia	114
Gráfica 2. Percepción de bienestar total	115
Gráfica 3. Calificación de la importancia de la afectación por habitantes de la calle (izq.) y expendio de drogas (der.) para residentes de zonas aledañas a humedales	117
Gráfico 4. Calificación de afectación por robos para residentes (izq.) y por enfermedades (der.)	118
Gráfica 5. Afectación por proliferación de roedores (izq.) e inundaciones para residentes de zonas aledañas a humedales (der.)	119
Gráfico 6. Actividades junto a la comunidad para la recuperación o mantenimiento del humedal en el último año	120

Gráfico 7. Distribución de los entrevistados residentes en aprovechamiento de productos del humedal	121
Gráfico 8. Distribución de la población entrevistada de acuerdo con su opinión sobre las posibles actividades que pueden desarrollarse en el humedal	122
Gráfico 9. Distribución de la población entrevistada sobre las posibles actividades que pueden desarrollarse en el humedal	123
Gráfica 10. Disposición a pagar de vecinos residentes y trabajadores no residentes para la recuperación total del humedal	124
Gráfica 10. Disposición a pagar de vecinos residentes y trabajadores no residentes para la recuperación total del humedal por grupo poblacional	125
Tabla 3. Aproximaciones al potencial de recaudo para recuperación	125
Capítulo 6. Calidad de suelo, aire y agua en Capellanía y La Conejera	129
Figura 1. Identificación puntos de muestreo de suelos La Conejera	130
Tabla 1. Georreferenciación: puntos de muestreo suelo humedal La Conejera	131
Figura 2. Puntos de muestreo en el humedal La Conejera	131
Tabla 2. Resultados parámetros analizados humedal La Conejera	132
Tabla 3. Resultados relaciones catiónicas humedal La Conejera	133
Figura 3. Identificación puntos de muestreo de suelos Capellanía	134
Tabla 4. Georreferenciación puntos de muestreo suelo humedal Capellanía	134
Figura 4. Puntos de muestreo en el humedal Capellanía	135
Tabla 5. Resultados parámetros analizados Capellanía	135
Tabla 6. Resultados relaciones catiónicas muestras de suelo humedal Capellanía	136
Tabla 7. Resultados relaciones catiónicas: muestras de suelo Capellanía y La Conejera	137
Figura 5. Comparación con valores de referencia de Pb de diferentes regiones	138
Figura 6. Comparación con valores de referencia de Cd de diferentes regiones	139

Figura 7. Comparación con valores de referencia de Cu de diferentes regiones	140
Figura 8. Comparación con valores de referencia de Zn de diferentes regiones	141
Figura 9. Comparación con valores de referencia de Cr de diferentes regiones	142
Tabla 8. Georreferenciación puntos de muestreo	143
Figura 10. Puntos de muestreo	144
Tabla 9. Desviación de los parámetros Decreto 1594 de 1984	145
Tabla 10. Valores subíndice I para el cálculo de ICOMO	146
Tabla 11. Resultados índices de contaminación del agua en Colombia humedales Capellanía y La Conejera	146
Tabla 12. Valores de índices de contaminación internacionales	147
Tabla 13. Resultados índices de calidad del agua internacionales	149
Figura 11. Comparación de ICOMO (izq.), ICOSUS (der.) e ICOTRO (inferior)	149
Figura 12. Ubicación de las estaciones de la RMCA	152
Figura 13. Ubicación de la estación de monitoreo de Suba (Corpas)	153
Figura 14. Ubicación de la estación de monitoreo de Fontibón	153
Tabla 14. Aspectos generales de la estaciones Suba y Fontibón	154
Figura 16. Velocidad y dirección del viento de Bogotá	158
Tabla 15. Contaminantes de interés reportados Suba (Corpas) y Fontibón	160
Tabla 16. Caracterización de los datos reportados para los contaminantes de interés	160
Tabla 17. Concentración promedio mensual y anual de PM_{10} ($\mu g/m^3$)	160
Tabla 18. Concentración máxima y mínima de PM_{10} y cumplimiento de la Resolución 601 de 2006	161
Gráfica 1. Consultas por enfermedad respiratoria aguda (ERA) Fontibón	162
Tabla 19. Concentración máxima y mínima de CO y cumplimiento de la Resolución 601/2006	162
Gráfica 2. Variación de la concentración de CO (ppm) para la estación de Fontibón	163
Tabla 20. Concentración Promedio Mensual y Anual de O_3 (ppb) para las estaciones de Fontibón y Suba (Corpas) años 2008, 2009 y 2010	164

Tabla 21. Concentración máxima y mínima O_3 y cumplimiento de la Resolución 601 de 2006	164
Gráfica 3. Variación de la concentración de O_3 (ppb) para las estaciones de Fontibón y Suba	165
Tabla 22. Concentración promedio mensual y anual de NO_2 (ppb) para las estaciones de Fontibón y Suba (Corpas)	165
Tabla 23. Concentración NO_2 (ppb) y cumplimiento de la Resolución 601 de 2006	166
Tabla 24. Concentración SO_2 (ppb) y cumplimiento de la Resolución 601 de 2006	167
Gráfica 4. Variación de la concentración de SO_2 (ppb) Fontibón y Suba (Corpas)	168
Tabla 25. Índice de calidad del aire	168
Capítulo 7. Avifauna en Capellanía y La Conejera: especies amenazadas y funcionalidad	181
Gráfica 1. Cantidad de especies según la categoría taxonómica (familia)	185
Gráfica 2. Familias por humedal	186
Tabla 1. Gremios tróficos y especies que los usufructúan en los humedales	186
Gráfica 3. Especies que consumen invertebrados acuáticos, peces y plantas acuáticas	187
Capítulo 8. Relación entre vectores asociados a los humedales Capellanía y La Conejera, y las infecciones respiratorias agudas (IRA), enfermedad del aparato digestivo (EDA) y dermatitis	197
Tabla 1. Enfermedades y parásitos de las EDA	202
Tabla 2. Descripción de la variable dependiente	204
Gráfica 1. Valores de temperatura media en los humedales La Conejera y Capellanía	205
Gráfica 2. Aproximación a la pluviosidad media del humedal Capellanía	206
Gráfica 3. Aproximación a la pluviosidad media del humedal La Conejera	206
Tabla 3. Resultados de estimaciones econométricas	207

Agradecimientos

Con nostalgia recuerda Héctor Cristancho que en una época de su juventud se deleitaba al contemplar que en el humedal Capellanía el paso viajero de los patos argentinos y los canadienses, la tingua pecho amarilla, pecho azul, pecho rojo, fauna maravillosa que según su percepción desde hace un tiempo ha dejado de hacer parte del paisaje del barrio. Esta realidad de extinción del paisaje ha sido motivación para líderes en diferentes partes de la ciudad, de movilizarse en una lucha incesante por el rescate y protección de estos espacios que constituyen la vida de la ciudad y la garantía de un mañana provechoso para millones de bogotanos que dependen de la calidad de los tomadores de decisiones de hoy.

La presente investigación es el resultado de un esfuerzo mancomunado de científicos de diferentes disciplinas, sumado a la generosidad de líderes cívicos, que pusieron a disposición de nuestro equipo una realidad común de amenaza, pero también de compromiso con la tolerancia y respeto al entorno. En agradecimiento a esos múltiples actores comunitarios, académicos y líderes sociales que hicieron posible este ejercicio, se escribe este libro con la esperanza de que se pueda aportar en generar conciencia y trabajar en conjunto hacia una visión de una ciudad integrada, sostenible que garantice una calidad de vida en armonía con la naturaleza para las generaciones venideras.

Es preciso, además, expresar gratitud a la Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables de la Fundación Universitaria Los Libertadores en cabeza de sus directivas y decanatura, cuyos recursos y talento humano apoyaron esta investigación, siempre con la confianza en que nuestros resultados serían de calidad y apoyo a la discusión social en la temática. Por otro lado, es de resaltar la labor desarrollada por los estudiantes del semillero de investigación en economía ambiental y desarrollo sostenible de la facultad quienes apoyaron activamente el proceso de articulación con la comunidad y fueron un gran eslabón en el entendimiento de las necesidades sociales desde el tema ambiental. Un agradecimiento muy especial a mis colegas parte del equipo docente y directivo de la Fundación Universitaria Los Libertadores de quienes recibí apoyo, espacios de discusión del material presentado y valiosos aportes, comentarios y sugerencias para fortalecer la investigación. También agradezco el incansable apoyo de mis asistentes de investigación Paula Ramos y Margarita Vaca.

Igualmente, agradezco el apoyo de las alcaldías locales de Suba y Fontibón, por la actitud y espacios abiertos dentro de su administración en el tema ambiental, a los referentes ambientales Alejandra Amaya y Luis Carlos Abadía, apoyo entusiasta a cada fase de esta investigación. Así como el referente ambiental de Suba, Fredy Cruz, por la contextualización de la situación de la localidad; además, agradecer a Ana María Niño, Directora de la Fundación Humedal La Conejera, y Laura Galindo, bióloga del humedal por sus contribuciones a nuestro conocimiento del mismo.

Debemos agradecer especialmente a grandes ciudadanos por quienes siento gran respeto y admiración, por su amor al humedal Capellanía y la defensa de los espacios ambientales en Fontibón, son ellos realmente quienes siguen de cerca el tema ambiental y a través de sus múltiples actividades buscan ser la voz de los pájaros, los patos y todos los animales y plantas del humedal. A Héctor Cristancho, Luis Guillermo Bernal, Luis Carlos Abadía y Pedro Vargas, de la Corporación Promotores Cívicos Humanitarios de Colombia, y todo su gran equipo por su constante acompañamiento y generosidad en el compartir, el conocimiento de años en el estudio de los humedales, no los olvidamos, su labor es vital, muchos de sus testimonios y voz viva quedaron reflejados en un trabajo audiovisual que pueden encontrar en Youtube bajo el nombre *Capellanía y Conejera dos pulmones de la ciudad*.

Adicionalmente, quiero agradecer a las entidades gubernamentales y administrativas involucradas en esta labor como el apoyo de los funcionarios de la Secretaría Distrital de Ambiente y la Gerencia ambiental de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, quienes siempre presentaron una disposición en el reconocimiento de las estrategias de preservación y los desafíos de la ciudad, que sus oficinas han identificado frente al tema.

Por último, pero no menos importante, agradezco a mi familia, especialmente a mi esposo David por su fe en mi labor, valiosos comentarios y continua motivación por persistir en esta tarea.

Tatiana Gélvez Rubio
Editora

Prólogo

Con la adhesión de Colombia a la Convención de Ramsar en 1998, el país adoptó una postura marcadamente a favor de la preservación y recuperación de los humedales, que se encontraban amenazados por el creciente desarrollo urbanístico de las ciudades colombianas en la década de los 90. Desde entonces, con la agudización del cambio climático y el aumento insostenible de la temperatura global, los humedales han recobrado la importancia que les pertenece en cuanto al desarrollo de políticas públicas ambientalistas, por ser parte fundamental del ciclo del agua.

Los constantes desequilibrios observados en torno a la cantidad disponible de agua necesaria para la subsistencia de la vida humana y la calidad de la misma pueden entenderse revisando las condiciones ambientales y económicas de las principales fuentes de este recurso natural esencial. Al respecto, es incuestionable que los humedales representan un punto medular para el buen manejo de los ecosistemas, no en vano existe la voluntad manifiesta de distintas organizaciones gubernamentales y privadas de organizar un marco institucional enfocado en el cuidado de los humedales.

Desde luego, el Instituto de Política Medioambiental Europea (IEEP), el Convenio de Diversidad Biológica (CDB), la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y la mencionada convención conforman dicho eje institucional capaz de supervisar mundialmente el tratamiento dado a los humedales en alto riesgo de degradación, así como de restaurar aquellos que por la acción humana han desmejorado su capacidad de generar elementos naturales vitales para el ecosistema.

En el mismo sentido la academia se ha convertido en un aliado fundamental de las principales autoridades ambientales, para realizar investigaciones y estudios de caso con fines de diseñar políticas públicas que garanticen el uso eficiente de los humedales. Con esta publicación titulada *Valoración económica de humedales caso Capellanía y La Conejera en Bogotá*, se aporta un protocolo básico para la valoración económica de humedales en la ciudad de Bogotá, con el cual los diseñadores de políticas medioambientales contarán con un marco de referencia de gran contenido metodológico para establecer parámetros económicos desde los cuales podrán realizarse estrategias que permitan obtener un mayor beneficio de los humedales, puntualmente de los de La Conejera y de Capellanía.

Entre los 14 humedales reconocidos como tal actualmente en la ciudad de Bogotá, La Conejera y Capellanía representan dos de los más importantes de la capital por su potencial para la preservación de la vida natural, animal y vegetal, y para el buen funcionamiento del ciclo del agua. Ubicados en las localidades de Suba y Fontibón respectivamente, estos humedales albergan más de 300 especies de flora terrestre, acuática y semiacuática, además de alrededor de 150 clases de aves tanto permanentes como migratorias.

Ambos humedales han tenido un precedente histórico demarcado por el deterioro de sus condiciones naturales debido al desarrollo urbanístico e industrial; no obstante, desde la Convención de Ramsar la tendencia restauradora y de preservación ha sido decisiva para dar inicio a investigaciones interdisciplinarias que contribuyan con tal objetivo.

El libro *Valoración económica de humedales en Bogotá* ha sido elaborado por un selecto equipo de profesionales con un nivel importante de conocimientos acerca de la metodología para la valoración económica ambiental, así como del conocimiento acerca de los humedales La Conejera y Capellanía en Bogotá. De modo que el lector encontrará un documento con gran valor metodológico y teórico para el análisis de los humedales desde una perspectiva económico-ambiental, que ha sido posible por el compromiso de este equipo y el respaldo de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Álvaro Luis Mercado Suárez

Decano

Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables

Abreviaciones

PEDH	Parques ecológicos distritales de humedal
BSA	Bienes y servicios ambientales
MVC	Método de valoración contingente
MH	Método de precios hedónicos
VET	Valoración económica total
DAP	Disposición a pagar
MV	Método de costos de viaje
MH	Método de precios hedónicos
EC	Excedente del consumidor
MEA	Evaluación de ecosistemas del milenio
MR	Método de costo de reemplazo
MO	Método de costo de oportunidad
MM	Método de precios de mercado
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
CE	Conductividad eléctrica
HN	Humedales naturales
ICOMO	Índice de contaminación por materia orgánica
UD	Usos directos
UI	Usos indirectos
VNU	Valor de no uso
EPP	Estructura ecológica principal
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá
PMA	Plan de manejo ambiental
ZMPA	Zona de manejo y preservación ambiental
CAL	Comisión ambiental local
SDA	Secretaría de ambiente distrital
UAESP	Unidad administrativa de servicios públicos
JBB	Jardín Botánico de Bogotá
IDU	Instituto de desarrollo urbano
PROCEDA	Proyectos ciudadanos de educación ambiental
PRAES	Proyectos ambientales escolares
CAR	Corporación Autónoma Regional
JAL	Junta de acción local

PEDM	Parque ecológico distrital de montaña
ALO	Avenida longitudinal de occidente
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
IRA	Infecciones respiratorias agudas
EDA	Enfermedades diarreicas agudas
JAC	Junta de acción comunal
IDEAM	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales
OPS	Organización panamericana de la salud
SDS	Secretaría de salud de Bogotá

PRIMERA PARTE METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN



Jenny Catalina Mora Jiménez.

INTRODUCCIÓN

Valoración económica de humedales

Tatiana Gélvez Rubio

*En la economía de la naturaleza
la moneda no es el dinero, es la vida*

Vandana Shiva

Ya han pasado más de dos siglos desde las expediciones botánicas de José Celestino Mutis en 1783, las más costosas entre aquellas del Nuevo Reino de Granada. Sin embargo, su importancia sobrepasa el plano de las ciencias naturales, pero ¿qué relación podría guardar una recolección de plantas, flores e insectos con el desarrollo político de un territorio? Liévano (1996) por ejemplo resalta su importancia en el surgimiento de movimientos independentistas, al encontrarse ilustres ciudadanos tales como Antonio Francisco Zea, Jorge Tadeo Lozano y Francisco José de Caldas, quienes hicieron parte activa del movimiento de independencia.

La palabra ‘investigar’ del latín *investigare* se entiende como *ir detrás de la huella* y al igual que la naturaleza, esta es un lenguaje universal, abierto, múltiple y diverso que no está limitado por áreas. En la antigua Grecia, por citar un ejemplo, los filósofos estudiaban desde astronomía hasta ciencias políticas de manera integrada; esta visión, perdida en el tiempo, ha generado un lenguaje atomizado en ciencias que no pueden responder de manera individual a los desafíos actuales de la humanidad. En efecto, los problemas de la sociedad moderna son complejos y por tanto requieren respuestas que atiendan a necesidades variadas desde diferentes áreas del conocimiento. Para el caso de los humedales de Bogotá, la investigación interdisciplinar se constituyó

como un elemento fundamental, que exigió flexibilidad adaptativa de todos los investigadores para tener en cuenta diferentes perspectivas teóricas e incluso la incursión en nuevas propuestas metodológicas para armonizar diferentes visiones epistemológicas y lograr un trabajo conjunto.

En este sentido, a pesar de que corrientes de pensamiento como la fisiocracia consideraban que la riqueza se encontraba en la naturaleza. El paradigma neoclásico ha diseminado la perspectiva del recurso natural como un medio de producción y no como un bien final de consumo, por lo que en el estudio convencional de la ciencia económica ha situado a los investigadores frente a la ausencia de un paradigma integral para el estudio del medio ambiente. Esta ausencia de un paradigma de comprensión de los bienes ambientales como un fin ha conllevado a la insostenibilidad del sistema económico actual, poniendo en riesgo no solamente a las necesidades de consumo y calidad de vida del planeta, sino además a la posibilidad del usufructo de los mismos para las generaciones venideras.

En lo relacionado al medio natural, en los ecosistemas con mayor impacto por intervención humana, se destacan los humedales naturales (HN). Estos espacios mustios en aspecto se caracterizan por contar con territorios fangosos a causa de su condición de zonas freáticas altas, que se ubican dentro de los más importantes en tiempos de cambio climático dada su capacidad funcional para la regulación de inundaciones y sequías, refugio de avifauna, procesos de polinización, estabilidad en fertilidad de suelos y regulación natural de vectores de enfermedades; elementos que además de su valor de herencia y legado hacen imperativo su estudio y preservación para el desarrollo sostenible de ciudades y territorios.

De acuerdo con el Manual de la Convención de Ramsar¹ los humedales se definen como “zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio ambiente con plantas asociadas y vida animal” (Ramsar, 2012). En términos económicos, los humedales se encuentran entre los ecosistemas más productivos del mundo, pero solo se logrará su preservación si el valor monetario es mayor que los usos alternativos propuestos para el humedal. De aquí, que estudios económicos por medio de la valoración monetaria representen un referente inicial en su protección y mantenimiento al obtener mayores resultados en bienestar social que los usos alternativos que se le puedan dar a esos espacios (Barbier, 1997).

1 Acuerdo intergubernamental sobre medio ambiente. El tratado se negoció en 1960 entre países y organizaciones no gubernamentales preocupados por la creciente pérdida y degradación de los hábitats de humedales para las aves acuáticas migratorias. Se adoptó en la ciudad iraní de Ramsar en 1971 y entró en vigor en 1975.

Generalidades de los humedales naturales (HN)

Se reconoce la existencia de territorios como humedales en 5 categorías básicas presentadas en la tabla 1. Dichas categorías generan un enlace directo entre la ubicación (costero o interior) y las posibles áreas de impacto. Por ejemplo, un humedal marino tiene implicaciones no solamente en el territorio aledaño sino incluso a nivel interoceánico lo que amplía, más allá de su área de influencia directa, los resultados del análisis. De este modo, las dos primeras propuestas corresponden a territorios de salidas marítimas. Las categorías tres y cuatro por su parte, hacen referencia a ecosistemas de agua dulce con cercanía a ríos (territorios interiores), y la quinta categoría, comprende territorios que tienen conexión al mar, pero siguen interconectados con ecosistemas de agua dulce.

Tabla 1. Categorías de humedales reconocidas por Ramsar

Categoría	Tipos de humedales
1. Marinos	Humedales costeros, lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral.
2. Estuarinos	Deltas, marismas de marea y manglares.
3. Lacustrinos	Humedales asociados con lagos.
4. Ribereños	Humedales adyacentes a ríos y arroyos.
5. Palustres	Pantanosos: marismas, pantanos y ciénagas.

Fuente: Elaboración propia con base en Ramsar (2012).

Dado que los servicios prestados por los humedales no se negocian en los mercados, para su debida preservación se han generado herramientas de evaluación tales como el análisis de impacto (medición de daños por fuente externa específica), la evaluación parcial (opciones para el uso alternativo del suelo) y finalmente, la evaluación global que busca analizar la contribución económica o los beneficios netos sociales de los humedales (Barbier, 1994). Es importante destacar que los errores en la valoración conducen a una asignación ineficiente de los recursos, ya que en muchos casos las valoraciones se relacionan con los resultados potenciales (efectos sobre la salud, mejoras en el medio ambiente, entre otros), mientras que los usos alternativos se centran en los beneficios privados de corto plazo.

En este sentido, el valor económico total (VET) debe ser igual a la suma del valor de uso y el valor de no uso: $VET = VU F(UD, UI, UP) + VNU$. Donde VU representa el valor de uso y está relacionado con el uso actual o futuro de los recursos y sus servicios, que puede ser subdividido en valores de usos directos, valores de usos indirectos y valores de usos potenciales. El valor de no uso (VNU) por su parte es el más difícil de obtener, ya que valora la continua existencia del recurso

separado de cualquier intento de usarlo y contiene el valor puro intrínseco de la naturaleza (EU Commission, 2001; Lambert, 2003).

De acuerdo con la Comisión Europea (2001), los usos directos (UD) hacen referencia a los bienes y servicios asociados al humedal que sustituyen la demanda de bienes como el agua para consumo, leña, etc., a los cuales se puede hacer una aproximación de valor monetario de acuerdo con los precios de mercado. Los usos indirectos por su parte se definen como todos los servicios ecosistémicos que se entienden como la totalidad de los aspectos de balance que posibilitan la vida humana y el equilibrio del hombre y su entorno.

Por último, los usos potenciales (UP) se relacionan con todos los posibles usos futuros asociados al ecosistema. La tabla 2 muestra las diferentes funciones asociadas a los humedales para la valoración económica, que deben ser categorizada de acuerdo con el tipo de uso.

Tabla 2. Funciones de los humedales

Regulación	Almacenamiento y reciclaje	Control
	Nutrientes	Salinidad (tratamiento del agua)
	Desechos humanos	Climático
	Residuos orgánicos	Captura de carbono
	Recarga y descarga	Mantenimiento
	Aguas subterráneas	Hábitats de migración y cría
	Control	Estabilidad del ecosistema
	Inundaciones y caudal	Integridad de otros ecosistemas
Transporte	Erosión de suelos	Diversidad biológica y genética
	Agricultura y riego	Producción de energía
	Ganadería (pastoreo)	Turismo y recreación
	Cultivos	Asentamientos humanos
Producción	Transporte	Hábitat de especies de plantas y animales
	Agua para consumo humano	Recursos medicinales
	Alimentos	Recursos genéticos
Información	Leña	Materias primas de uso industrial
	Investigación, educación y vigilancia	
	Singularidad, rareza o naturalidad y su papel en la herencia cultural	

Fuente: Schuyt y Brander (2004).

Una de las mayores dificultades al momento de determinar un VET es la correcta identificación de los usos asociados a cada una de estas funciones. Por ejemplo, turismo y recreación podrían ser representados como usos directos si al momento de realizar la valoración ya existen dinámicas económicas asociadas a actividades recreativas; podrían ser usos potenciales si existiera la posibilidad en un futuro indeterminado de la explotación de dichas actividades. Conviene subrayar que todas estas funciones son transformadas en valores económicos

con el fin de proporcionar información apropiada para el contexto del bien valorado, situaciones contrarias pueden generar una valoración económica equivocada de estas funciones e implicar políticas ineficientes.

Como una primera aproximación a la valoración monetaria de cada una de las funciones, el Foro Mundial para la Naturaleza (wwf) y el Instituto de Estudios del Medio Ambiente de EE.UU. (2004) presentan el valor económico medio para cada una de ellas, el cual se expresa como el valor en dólares anuales por hectárea derivados de las funciones de los humedales (Schuyt y Brander, 2004). Por tanto, al sumar solamente las funciones de regulación asociadas a los humedales se obtiene un total de \$1212 USD por hectárea al año, lo cual contrastado con sus valores de usos alternativos presenta un valor significativamente mayor.

UD y UI en Capellanía y La Conejera

Elementos como la migración por economías concéntricas desde otros espacios del país hacia la ciudad de Bogotá hacen que los valores intrínsecos de identidad, especificados como resulten ambiguos en aplicación al presentar una comunidad que no encuentra valores de identidad cultural. En este sentido, las funciones que pueden ser valoradas se especifican en la tabla 3, en la que se puede observar que estas funciones particulares presentan una menor cantidad de categorías, por ejemplo, las funciones de recreación se muestran inexistentes al ser espacios reconocidos como una externalidad negativa.

Tabla 3. Funciones ambientales de los PEDH La Conejera y Capellanía

Funciones	Subfunciones	Conejera	Capellanía
Regulación	Control natural de inundaciones y regulación	X	X
	Captura de carbono	X	X
	Hábitats de migración y cría	X	X
	Mantenimiento de hábitats de migración y cría	X	
Transporte	Hábitat y viveros para plantas y animales	X	
Información	Investigación, educación y vigilancia	X	
	Herencia y valores culturales		X

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la categoría de funciones de regulación, en las cuales se destacan los hábitats para fauna de migración y cría con problemáticas como el parasitismo en especies, que ha resultado en la disminución de ejemplares y el aumento de individuos a lo largo del tiempo especialmente en el caso del PEDH

La Conejera que cuenta con más área vegetal. En términos de investigación y vigilancia, hay una mayor participación y reconocimiento del PEDH La Conejera por medio del aula ambiental, mientras que en el caso de Capellanía, debido a su condición deficiente en cuanto a cerramiento, alta concentración de residuos sólidos urbanos y la ausencia de espacios de conocimiento de flora y fauna, estas condiciones del entorno especificaron las funciones ambientales particulares.

A nivel de funciones y métodos de valoración, se presenta en la tabla 3 la identificación de los usos y métodos de aplicación para el caso de los PEDH Capellanía y La Conejera de acuerdo con Brander (2006). En términos generales, se puede visibilizar un claro uso del método de valoración contingente, el de precios hedónicos y usos predominantemente indirectos en las funciones ambientales de los humedales Capellanía y La Conejera. Sin embargo, se resaltan los valores de inundaciones y caudal con impactos directos sobre las personas, así como el medio natural con impacto directo sobre la calidad del aire, de los suelos y del agua en la calidad de vida de los habitantes cercanos a los humedales.

Adicionalmente, estos humedales cumplen con servicios ambientales como purificación del aire, regulación microclimática, reducción de ruido, drenaje de aguas lluvias, tratamiento de aguas residuales y oferta de espacios para la recreación (Bejarano & Bonilla, 2009). Estos ecosistemas a su vez son presionados por el crecimiento de la ciudad y su problemática social, cultural y ambiental (Ramírez et ál., 2002).

Organización del libro

En Bogotá, la expansión espontánea de la ciudad y el afán frenético del gobierno de la ciudad a lo largo de la historia por atender las demandas de vías urbanas ha horadado de manera brutal los ecosistemas, que ha dejado desconectadas sus funciones; la insensatez del proceso ha sido semejante a si un médico decidiera que la mejor manera de mejorar la funcionalidad de su cuerpo es abrirle un hueco de estómago a espalda. Sumado a ello, es innegable que la protección de los humedales ha sido un tema de segunda categoría en la política pública de la ciudad, por lo que el interés de constructoras y un desbordado crecimiento de la población de la ciudad han conducido a una ineficiente protección.

Recientemente, la ciudad ha revivido la discusión de los humedales con dos temáticas en específico: la construcción de la Avenida Longitudinal de Occidente (ALO) y la Reserva van der Hammen, en estos dos temas se ha mostrado la priorización de la construcción sobre la sobrevivencia de las hectáreas que aún permanecen. Este libro busca aportar desde la academia a la opinión pública en general que hoy desconoce los beneficios que estos ecosistemas brindan a la calidad de vida de los bogotanos, y que a través del libro mostramos, que

a pesar del abandono, siguen generando provisión de servicios ecosistémicos a la ciudad.

La primera parte compuesta por los capítulos primero a tercero presenta una revisión metodológica de herramientas de medición y procesos empleados en la construcción de parámetros de percepción o calidad de las condiciones del ecosistema. En el capítulo 1, Angie Upegui y Antonio Robles presentan de manera general los principales conceptos como la disposición a pagar, que posteriormente es evaluado en el capítulo 5, con el método de costo de oportunidad y las problemáticas de afectaciones a la salud, calidad de aire, entre otros. En el capítulo 2, Óscar Lombana relaciona las metodologías de valoración de degradación en suelos, agua y calidad de aire, y presenta desde el punto de vista metodológico los principales parámetros de medición y su impacto en los ecosistemas.

En el aspecto comunitario, en el capítulo 3, Ángela Hurtado presenta la descripción completa del diseño de la herramienta de medición de la percepción comunitaria, mediante el uso de encuestas semiestructuradas de acuerdo a la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA, por su sigla en inglés), por medio de un esquema de preguntas abiertas con respuestas cualitativas. En esta sección se presenta la justificación de protección de los ecosistemas desde la perspectiva de los bienes y servicios ambientales (BSA) y sus impactos sobre la preferencia de los habitantes frente a la recuperación y su voluntad de pago asociado a dicho proceso.

La segunda parte, se compone de los capítulos cuarto al séptimo, que presentan de manera extensa los resultados del trabajo de campo del equipo de investigación, así como las experiencias desarrolladas en términos de la valoración desde el punto de vista cuantitativo.

En el capítulo 4, Guillermo Villamil presenta la revisión histórica del proceso de formación y las actuales condiciones en área geográfica de los humedales de la ciudad, así como una aproximación cuantitativa hacia la profundidad y actual capacidad de embalse del cuerpo de agua del ecosistema por medio del uso de fotografías y sistemas satelitales. Entre los resultados más significativos se encuentra la pérdida del área de los humedales y por tanto la reducción significativa en el área con capacidad de embalse, en el que la presión urbana es el principal factor de amenaza.

En el capítulo 5, Tatiana Gélvez y Ángela Hurtado presentan una breve revisión de la estructura legal e institucional a nivel distrital en la protección de los humedales. Adicionalmente, se describen los resultados de la aplicación de la herramienta de encuestas en la población circundante a los humedales de Capellanía y La Conejera. Se resalta el valor como bien público que se captura en la población estudiada, así como una disposición a pagar positiva de recuperación de los ecosistemas. Sin embargo, se evidencia una baja participación

en actividades relacionadas con el cuidado de estos espacios y un desconocimiento de los mecanismos activos que cuentan en sus localidades; en este sentido, se traza un desafío a la tributación teniendo en cuenta la complejidad de la estructura administrativa de los humedales.

En el capítulo 6, Oscar Lombana presenta los resultados de la aplicación de las herramientas metodológicas planteadas en el capítulo 2 con el fin de identificar los principales actores involucrados en la contaminación del ecosistema y generar algunas recomendaciones frente a los factores de mayor impacto en los niveles actuales de degradación en agua y suelos, así como una descripción de los resultados del análisis de los datos de calidad de aire.

Frente a la temática de avifauna, Rafael Gutiérrez, en el capítulo 7, realiza una descripción de la fauna presente en los humedales y su importancia económica. Mediante ejercicios de avistamiento y conteo, se realizó una caracterización de la lista de aves asociadas a los humedales y su importancia en la estructura ecológica del ecosistema, así como los resultados de las visitas.

Referencias

- BARBIER, E. (1994). Valuing environmental functions: tropical wetlands. *Land Economics*, 70(2), 155-73.
- BEJARANO MORA, P. A., & ARGENIS BONILLA, M. (2009). Dinámica espacio-temporal del humedal Juan Amarillo entre 1950-2005. *Acta Biológica Colombiana*, 14(1), 87-105. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319027882005>
- BRANDER, L. M., FLORAX, R. J., & VERMAAT, J.E. (2006). The empirics of wetland valuation: a comprehensive summary and a meta-analysis of the literature. *Environmental and Resource Economics*, 33(2), 223-250.
- ELLIOTT, M., & ECONÓMICA PARA EL MEDIO AMBIENTE CONSULTORÍA LTD (EFTEC) (2001). Estudio sobre la valoración y la restauración de los daños a los recursos naturales para los fines de responsabilidad ambiental. Comisión Europea, Dirección General de Medio Ambiente.
- LAMBERT, A. (2003). Valoración económica de los humedales: un componente importante de las estrategias de manejo de los humedales en la cuenca hidrográfica. Oficina de Ramsar.
- LIÉVANO AGUIRRE, I. (1996). *Los grandes conflictos sociales y económicos de nuestra historia, tomos I-II*. Bogotá, Ediciones Tercer Mundo.
- RAMÍREZ, C., SAN MARTÍN, C., & RUBILAR, H. (2002). Una propuesta para la clasificación de humedales chilenos. *Revista Geográfica de Valparaíso*, (32-33), 265-273.
- RAMSAR. (2012). *Principios para la planificación y el manejo de los humedales urbanos y periurbanos*. Recuperado de <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/guide/guide-urban-sp.pdf>
- SCHUYT, K., & L. BRANDER (2004). *The economic values of the world's wetlands, living waters*. Recuperado de <http://awsassets.panda.org/downloads/wetlandsbrochurefinal.pdf>

CAPÍTULO 1

Métodos de valoración de servicios ecosistémicos

Angie Upegui y Antonio Robles

El modelo económico de crecimiento actual, basado en conductas de consumo masivo, no ha establecido como prioridad la conservación y protección de los recursos naturales. La degradación de los ecosistemas fundamentales alrededor del mundo amenaza no solo con la escasez de los recursos vitales sino además con la extinción de especies, incluido el ser humano. En efecto, la insostenibilidad del estilo de vida actual exige replantear los patrones de comportamiento de los individuos, así como la transformación de los paradigmas convencionales para evolucionar hacia criterios que reconozcan el valor de los bienes y servicios ambientales (BSA) más allá de su función como insumos en cadenas de producción industrial y como argumentos dentro de la función de bienestar social.

Esta necesidad ha conducido desde los años setenta al planteamiento de políticas públicas para recuperar áreas degradadas por la intervención humana, con numerosos casos exitosos como la recuperación del río Cuyahoga (1973) en EE.UU. o los humedales de East Anglia (1964) en el Reino Unido, por citar algunos ejemplos. A partir de este punto, se ha iniciado el reconocimiento de los BSA como bienes de mercado con la respectiva comercialización de sus derechos de uso, ilustrado en las acciones de la conferencia Rio+20, la cual contempló de manera directa el recurso hídrico natural como un bien puro de mercado (UNEP, 2012).

En este contexto, la valoración se convierte en una herramienta de primera necesidad, pues indica los argumentos económicos que sustentan la protección

de los ecosistemas. De tal modo, surgen hacia 1956 algunas propuestas metodológicas de valoración que por medio de simulación microeconómica para la maximización de una función de utilidad determinada revelan la disposición de pagar por los BSA como si fueran bienes de mercado¹. Así, a través de la asignación de valores monetarios a cada uno de los bienes y servicios de los ecosistemas se pretenden generar argumentos económicos que sustenten la recuperación y preservación de los bienes ambientales. Mediante estos métodos se distingue la naturaleza del bien o servicio ambiental, el valor de los bienes y su reconocimiento desde otra perspectiva.

Los métodos que se presentan a continuación hacen parte de un conjunto de técnicas de medición que permiten revelar la relación costo-beneficio al uso, mejora o daño de un bien ambiental por medio de la cuantificación monetaria de la ganancia o pérdida de un agente económico representativo con base en lo planteado por Jantzen (2006). De esta manera, se identifica un nivel máximo de eficiencia ambiental, se hace una revisión de los métodos de valoración más utilizados, así como de sus fortalezas en valoración y deficiencias desde el punto de vista metodológico o conceptual.

En la primera sección, se presentan los principios de la valoración económica total (VET) que se podrían considerar la hoja de ruta por ser el escenario ideal de valoración, pues capturan las características tangibles e intangibles de los ecosistemas. Sin embargo, la falta de información hace de su medición una tarea compleja. De aquí que los métodos subsecuentes precisen evaluaciones puntuales para los valores de uso (materiales) como también de no uso (reconocimiento e identidad). Al llegar a la segunda sección se encuentra el método de valoración contingente (MVC), uno de los más utilizados en la literatura en razón a sus argumentos desde la demanda de los bienes; se describen de manera particular los elementos de tipo analítico del método, así como sus aproximaciones empíricas. Adicionalmente, se aborda el método de costos de viaje (MV), en la última sección del capítulo.

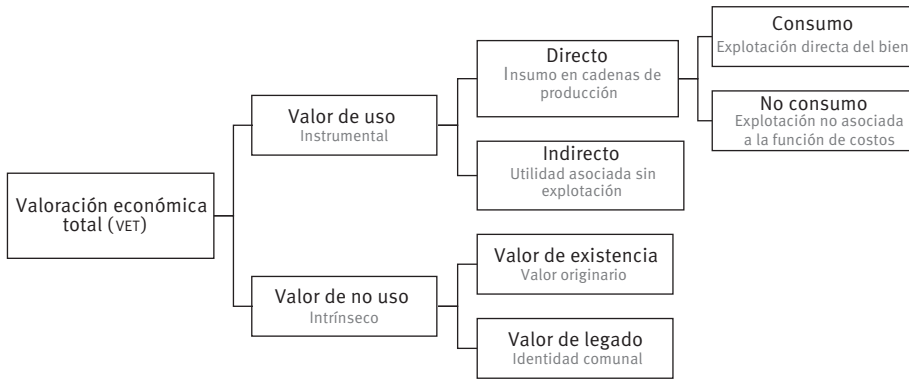
Valoración económica total (VET)

La VET es el resultado de un debate epistemológico al interior del estudio de la valoración ambiental. Por una parte, autores como Freeman (1993) y Dziegielewska (2013) entienden la valoración como una herramienta para medir la funcionalidad en la satisfacción de una necesidad material: *valor de uso*, mientras que otros autores desde una perspectiva ecológica incluyendo a Common y Stagl (2005) y Daly y Townsend (1993) plantean una postura holística de los

1 Es de anotar que la asignación de un precio de mercado es solamente figurativa debido a que de facto no se tranzan en el mercado.

valores intangibles y abstractos de la naturaleza conocida como *valor de no uso*, la figura 1 ilustra de manera amplia las dos perspectivas y su composición.

Figura 1. Condiciones de la VET



Fuente: Linares (2008).

En primera instancia, los valores de uso se refieren al valor de los BSA que son empleados por el hombre con fines de consumo y producción. Desde el enfoque de los valores de uso directo y de consumo, se plantea la creación de una función de productividad marginal que posibilite efectuar la medición del aporte de los BSA a partir de los precios de mercado. Por ejemplo, en la utilización del agua de un río como materia prima en la producción de una planta de bebidas gaseosas, este servicio se describe como insumo en cadenas de producción, cuantificable como cualquier insumo que puede estar involucrado en el proceso de optimización de la firma. Por otra parte, a los valores de uso directo de no consumo se involucran los costos indirectos que, retomando el ejemplo anterior, podrían ser el costo de instalar sumideros de residuos alejados a la planta de gaseosas.

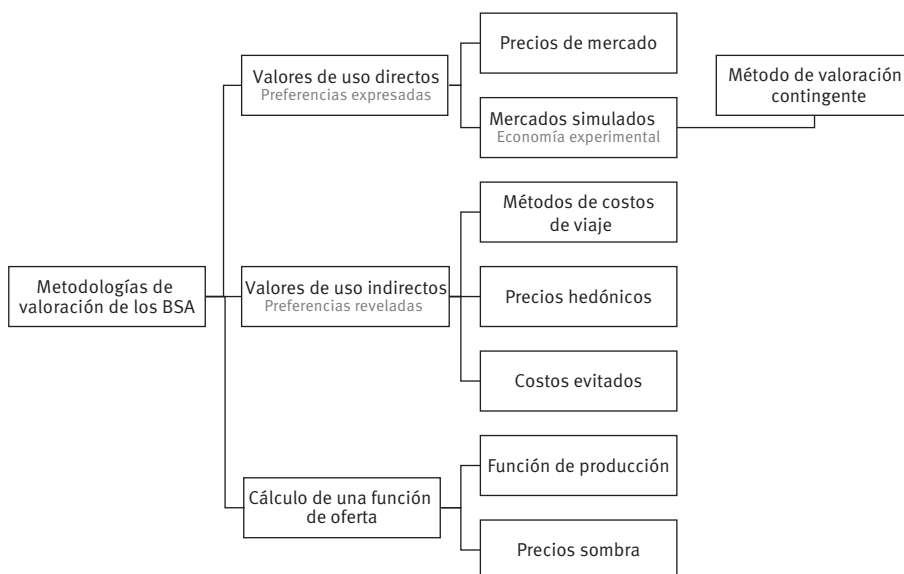
Por otra parte, los valores de uso indirecto se involucran dentro de la materialización de procesos productivos, pero no están relacionados con el aprovechamiento en sí de un recurso material tales como las condiciones climáticas favorables de los países del trópico para la producción de rosas en San Valentín, que sin estas condiciones climáticas perderían su ventaja comparativa en el mercado de las flores. Por lo tanto, estos argumentos no pueden ser distinguidos ni como insumos de un proceso productivo ni tampoco como parte de los costos indirectos. En cambio, se asocian a externalidades positivas que genera el medio ambiente al interior de los procesos de producción de un bien determinado.

En contraste, la corriente de pensamiento conocida como ecología profunda (*deep ecology*) plantea que los BSA *per se* cuentan con un valor originario rela-

cionado con valores subjetivos e intangibles de la naturaleza. En consecuencia, estos valores resultan difíciles de medir y valorar de manera cuantitativa. A pesar de lo anterior, se consideran argumentos dentro de la función de utilidad individual de los agentes económicos. En este caso, se puede ejemplificar como un valor de no uso el disfrute de la lectura de un libro bajo la sombra de un árbol, la contemplación de un amanecer frente al mar o la motivación de un hijo al regalar rosas a su madre en su cumpleaños. Asimismo, se identifican como valores de no uso los elementos de identidad tales como la creación de valores de herencia alrededor de recursos naturales, para el caso de la India, por citar un ejemplo, el río Ganges no solamente es un recurso natural sino un símbolo de la espiritualidad por lo que su significado trasciende su valor de utilidad hacia la transmisión de valores de generación en generación.

En suma, la VET resume las dos visiones académicas de la valoración. No obstante, para modelar dichas conductas y generar técnicas alternativas en la medición se hace referencia a los valores de uso directos e indirectos, así como a dos posibles enfoques: aquellos que parten desde el consumidor que se conocen como preferencias expresadas, de esta manera el cálculo de los valores monetarios de los BSA y aquellos que identifican los bienes que se valoran de acuerdo con las cualidades o atributos del bien que se denominan preferencias reveladas (Tietenberg, 2006). La figura 2 ilustra los métodos desde las perspectivas descritas.

Figura 2. Metodologías de valoración de los BSA



Fuente: Linares (2008).

En el caso del uso de los precios de mercado, es inusual la existencia de precios identificados de mercado que posibiliten la estimación del valor marginal del bien ambiental. No obstante, en la práctica para algunos casos donde se analizan bienes de valor de uso directo y de consumo puede existir un mercado de oferta y demanda. Cabe resaltar que estos precios deben ser analizados de manera rigurosa, pues su mera existencia no implica una identificación adecuada del valor marginal del bien, debido a que en algunos casos existen fallas de mercados que distorsionan los precios como indicadores de valor.

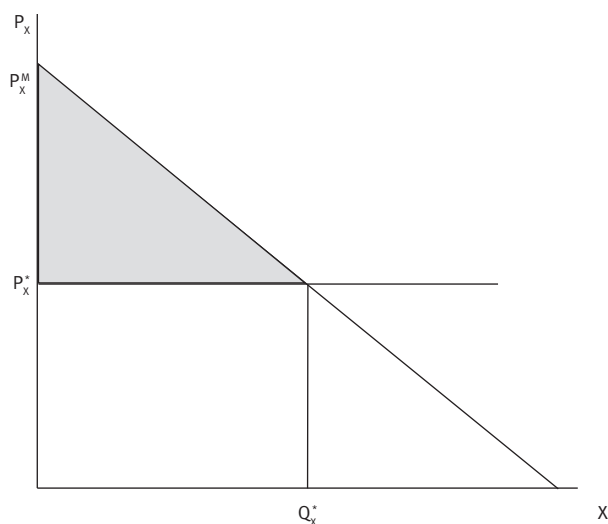
Los mercados simulados por su parte, articulan los desarrollos empíricos de la economía experimental con la caracterización de los bienes ambientales para dar como resultado la disposición de los individuos a pagar por los BSA; se resalta el trabajo de Vernon Smith (2002), quien mediante el diseño de mercados para la evaluación de políticas de regulación ambiental generó un análisis de las decisiones racionales frente al recurso hídrico.

Es importante señalar, que la elección de la herramienta de valoración podrá ser única o el resultado de una combinación de las distintas aproximaciones, debido a su carácter multidimensional en las actividades y problemas que deben ser incluidos dentro del análisis. Por ejemplo, el método de valoración contingente, que se describirá a continuación, es la combinación de los precios de competencia perfecta y la simulación de mercados. En este sentido, es la especificación correcta del problema ambiental a estudiar para una adecuada elección de los métodos de medición requeridos.

Método de Valoración Contingente (mvc)

El mvc denominado en la literatura como técnica de preferencia declarada fue propuesto por Ciriacy-Watrup (1952), con el fin de capturar la disposición monetaria a pagar por parte de agentes económicos como forma de retribución por una mejora ambiental. Esta metodología adopta el concepto del excedente de consumidor, entendido como la suma de las diferencias entre los niveles en la disposición a pagar (DAP) de los agentes económicos y el precio de equilibrio de un bien con respecto a diferentes niveles de producción. En este sentido, el mvc tiene como objetivo capturar la DAP de los consumidores potenciales por los servicios ambientales. En el gráfico 1, el área sombreada representa todos los posibles niveles de disposición a pagar por agentes en la demanda de un bien x . Por ejemplo, la provisión de frutos de un bosque determinada con un precio P_x^* de mercado, ilustraría que los agentes estarían dispuestos a pagar hasta P_x^M por la protección del bosque para continuar aprovechando sus beneficios en frutos.

Gráfico 1. Excedente del consumidor



Fuente: Elaboración propia.

El excedente del consumidor es un instrumento de medición de costes y beneficios ambientales por medio de una variación que involucra un valor monetario compensatorio que sustente la permanencia en el tiempo de los beneficios asociados a los BSA, o el pago monetario asociado a la tolerancia de un daño ambiental determinado. Como se mencionó, para obtener una medida de esta utilidad, se acude a los precios de mercado asociados a los valores de uso directos en relación con el bien ambiental. La creación artificial de un mercado se puede realizar mediante la aplicación de encuestas directas a los consumidores de algún bien o servicio ambiental; de esta manera se simula un mercado hipotético para dichos servicios demandados por el encuestado.

De aquí que a partir de este método sea posible estimar el valor de uso y no uso. De acuerdo con Mendieta (2000), el método responderá al problema de la maximización de la utilidad de acuerdo con las siguientes condiciones:

$$U = u(X, Q) \quad (1)$$

$$\sum_i p_i x_i q_i = M \quad (2)$$

Donde x representa un vector con la cantidad de bienes de mercado demandados x_i , Q un vector de bienes y servicios ambientales, x_i un vector de cantidades de los bienes de elección, p_i los precios asociados al vector de bienes,

q_i es los servicios ambientales por demandar y M el ingreso del consumidor. La maximización de la utilidad generará un vector óptimo de elección, en el cual se revela la DAP por parte del consumidor.

A diferencia del análisis microeconómico convencional, en el cual los precios hacen referencia a un pago monetario, en el modelo de valoración contingente, por tratarse de un bien público, no tiene una asignación real de precios de mercado, sino que se utilizan encuestas que permitan la obtención artificial de precios y valores de mercado asociados a los BSA de los ecosistemas². La DAP será un indicador que en primer lugar revela las cantidades óptimas demandas de los bienes ambientales y en segundo lugar provee los precios de pago asociados a las cantidades en el *equilibrio simulado* del método.

Este presenta en la práctica dificultades de aplicación debido a que el acierto en la valoración estará relacionado con la calidad de la encuesta empleada, en la cual se encuentran retos especialmente en la sensibilidad del consumidor potencial ante valores monetarios asociados a los bienes (debido al desconocimiento del valor intrínseco del bien a valorar). En este sentido, la restricción presupuestal de la población encuestada puede presentar valores muy bajos de asignación cuando los ingresos muestran un patrón de subsistencia en consumo de bienes finales, una condición recurrente en bienes con altos niveles de intervención y degradación.

Método de costos de viaje (mv)

El mv se aplica principalmente a la cuantificación de los costos y utilidades de un espacio de interés medio ambiental concreto (Riera, 1994). Este tipo de valoración supone que el bien ambiental tiene fines asociados a actividades recreativas, cuyo disfrute debe tener en cuenta el tiempo (costo de oportunidad de trabajar) y el valor monetario (costo del transporte para desplazarse al lugar, tiquetes de entrada...); estos dos factores representan el precio de acceso al bien o servicio ambiental. En este sentido, el resultado del proceso de minimización del gasto entre el costo de oportunidad en términos de tiempo, salario y gastos de desplazamiento y alojamiento, entre otros, dará como resultado la decisión del individuo de emprender o no el viaje. La ecuación 3 especifica esta relación, en la cual la variable de tiempo T es la restricción entre las actividades de trabajo (h) y recreación (x).

$$T = h + tx \quad (3)$$

2 Para la ampliación de las metodologías en la elaboración de encuestas remítase al capítulo 3 “Construcción de encuestas de percepción comunitaria y voluntad de pago de BSA”

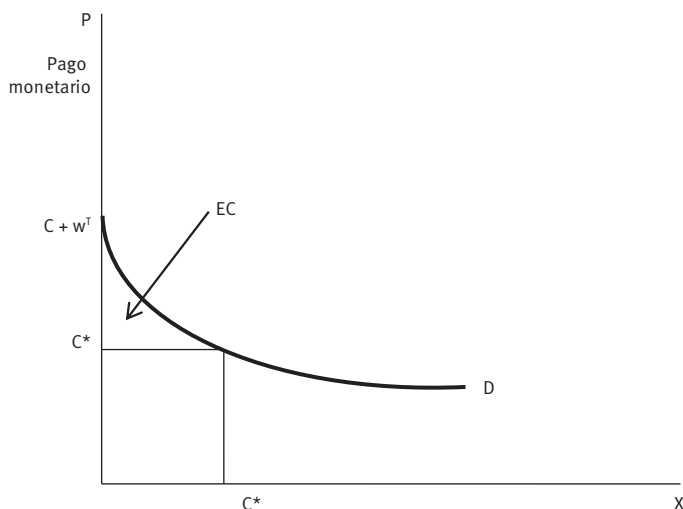
$$y = wh + y^o = w(T - tx) + y^o \tag{4}$$

$$y = cx + pz = wT + y^o - wtx \tag{5}$$

La ecuación 4 expresa que el ingreso y del individuo se explica por un ingreso salarial (wh) y no salarial (y^o). De la misma manera, los literales x y z de la ecuación 5 hacen referencia a los ingresos que se destinan al gasto de viaje y el gasto en otros bienes de consumo, donde c y p son proporciones de asignación del gasto. De esta manera, el nivel óptimo de demanda por viaje estará dado por la condición que el precio de los gastos de viaje sea inferior a los valores del punto $c + wt$; el área de diferencia entre estos dos valores estará asociada al excedente del consumidor (ver gráfico 2).

Se resalta que existe una sustitución perfecta entre los bienes de consumo y la visita ambiental. Sin embargo, cuando el costo de viaje incluya visitar más de un bien ambiental no necesariamente esto implicará un aumento de la demanda por viajes, pues no es posible determinar el valor unitario de cada uno.

Gráfico 2. Función de demanda por recreación



Fuente: Mendieta (2000).

Método de precios hedónicos (MH)

El MH evalúa las externalidades asociadas a los bienes ambientales como argumento de su utilidad de conservación. Generalmente, es utilizado como herramienta de cálculo del valor económico de bienes y servicios de ecosistemas que pueden generar costos privados o sociales. Los valores asociados a bienes

privados se pueden ver afectados por el estado de los ecosistemas (calidad del agua que genere costos en plantas de tratamiento o cambios de clima que arruinen cultivos) o bienes públicos (incrementos en el sistema de salud por mala calidad del aire o aumento de abortos en una población cerca de un río contaminado). Estos problemas generarán incentivo para la movilización de actores públicos y privados para la creación de políticas que mitiguen/previengan las externalidades negativas asociadas al deterioro ambiental.

Por ejemplo, en la valoración de predios y viviendas la inclusión del estado de los ecosistemas aledaños como parte del precio crea un identificador indirecto del impacto positivo/negativo asociado al ecosistema. En este caso, el inversionista ve reflejado en una disminución o incremento el valor de su inversión por estar cerca del ecosistema.

Este diferencial entre los precios de los predios sería considerado como parte del valor monetario del ecosistema. Una de las ventajas del método es el uso de datos reales del mercado, que asume que el investigador cuenta con una base de datos apropiada sobre la información de los predios. En la ecuación 6 en la cual se relaciona una función de producción del bien privado que cuenta con un impacto en precio por sus atributos particulares Z y los atributos ambientales A que lo representan, menos los costos asociados a su producción. Estos valores se relacionan con una función de oferta de los bienes resumida en la ecuación 7 que cuenta con los atributos especiales, los ambientales, la función de producción dados y unos atributos β determinados por la industria para su producción.

$$\pi = MP(Z,A) - C(M,Z,A,\beta) \quad (6)$$

$$\theta = f(Z,A,\pi,\beta) \quad (7)$$

Como se mencionó, dentro de las ventajas de los resultados a partir de esta valoración está la medición de los impactos en los cambios en el valor de bienes privados. No obstante, supone el conocimiento de los precios de los bienes los cuales, en el caso específico de predios, cuentan en la aplicación cuantitativa con sesgos positivos y negativos en los valores de mercado dados a los bienes por parte de sus propietarios.

Otros métodos

Los métodos anteriormente descritos relacionan decisiones de conservación teniendo en cuenta la demanda por BSA. Desde la perspectiva de la oferta, se contempla la cuantificación de los usos alternativos como hectáreas disponibles para urbanización y explotación de un recurso natural, entre otros. Sin

embargo, es importante anotar que además de ello existe un valor intrínseco (subjetivo) del bien valorado que es inobservable. Dentro de estos métodos se encuentran el método de costo de reemplazo (MR), el costo de oportunidad (MO) y los precios de mercado (MM).

El MR plantea que es posible compensar la pérdida de espacio natural por medio de la creación de una nueva área natural comparable; de tal forma pretende calcular los costos para sustituir los BAS que han sufrido daños a causa de la actividad humana o estimar los beneficios que se perciben por evitar que se genere un determinado daño o deterioro ambiental. El MO por su parte explica los costos de oportunidad de un recurso por el valor de usos alternativos de valores superiores, es decir, mide el beneficio que se deja de percibir por dedicarse a actividades de preservación. Para un área natural esto puede ser el uso agrícola, una carretera y en algunos casos el desarrollo económico: industria o vivienda. Finalmente, el MM presenta los valores de la naturaleza por la cantidad de cultivos, peces, madera y ganado, entre otros, que se puedan obtener mediante el uso sostenible del medio natural; debido a que existen precios de mercado de los bienes que se están explotando, es posible contabilizar el valor monetario de los mismos.

Conclusiones

Los métodos de valoración económica de BSA representan una buena aproximación a la valoración de ecosistemas desde un enfoque de oferta y demanda, incluso cuando se encuentran limitaciones de información. El método de valoración contingente, seleccionado en este ejercicio investigativo, permite estimar la valoración que otorga la población a los humedales Capellanía y La Conejera, y a los cambios en su bienestar como resultado de la oferta de los BSA, población que puede estar o no directamente asociada al ecosistema en cuestión. De esta manera, evaluando valores de uso y de no uso en situaciones simuladas, que arroja datos factibles para analizar desde la perspectiva económica, se concluye con la valoración en términos de DAP por parte de los agentes económicos (indicador expresado en unidades monetarias).

Por lo anterior, es pertinente destacar que la correcta especificación del problema, previa comprensión de los métodos definidos dará como resultado una exitosa valoración; lo cual identifica al detalle las potencialidades que tiene el ecosistema, no solamente en términos de valor de uso, sino también en valores intrínsecos. En este sentido, resulta de vital importancia para el investigador contar con un equipo interdisciplinar que pueda dar cuenta de otros factores además de los que convencionalmente generan valores de mercado, como los frutos o el abastecimiento de agua o la prevención de inundaciones por una buena capacidad de embalse de acuíferos, entre otros.

Para métodos más específicos como costos de viaje o precios hedónicos, se resalta el potencial del ecosistema, por ejemplo, un humedal de tipo lacústico como los que se encuentran en las ciénagas de la costa atlántica colombiana, puede generar elementos de identidad y pertenencia en las comunidades vecinas al difundir el conocimiento de dicha riqueza natural. En definitiva, es significativo traer a colación que los investigadores pueden generar la aplicación de múltiples métodos de ser necesario, para ello es importante que la especificación del objetivo de medición sea clara, pues cada metodología implica la observación y esfuerzo en un aspecto determinado.

Por último, se evidencia una limitante de estos métodos microfundamentados puesto que se asume una función de utilidad para un agente representativo; no obstante, teniendo en cuenta que existen elementos de identidad y herencia que caracterizan a cada individuo y lo hacen concebir una sobrevaloración o subvaloración al objeto, para el caso de los BSA continúa la duda acerca de si es válido asumir que todos los agentes económicos darán el mismo tipo de valoración; en otras palabras, la apreciación sigue siendo humana y por tanto, subjetiva.

Referencias bibliográficas

- BRANDER, L.M., FLORAX, R.J., & VERMAAT, J.E. (2006). Los empíricos de valoración de los humedales: un resumen completo y un meta análisis de la literatura de economía de los recursos. *Ambiental*, 33(2), 223-250.
- CIRIACY-WATRUP, S. V. (1952). *Resource conservation economics and policies*. Berkeley, California: University of California Press.
- COMMON, M., & STAGL, S. (2005). *Ecological economics: an introduction*. Nueva York: Cambridge University Press.
- DALY, H., & TOWNSEND, K. (eds.) (1993). *Valuing the earth: economics, ecology, ethics*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- DZIEGIELEWSKA, D. (2013). *Total economic value*. Recuperado de: <http://www.eoearth.org/view/article/156666>
- FREEMAN, A. M. (1993). *The measurement of environmental and resource values. Theory and methods*. Washington, DC, Resources for the Future.
- GALINDO NIÑO, L. (2008). Efectos de la restauración hidrogeomorfológica sobre la calidad del agua, los macro invertebrados acuáticos y la riqueza y abundancia de la avifauna en tres sectores del humedal La Conejera, Bogotá. (Trabajo de grado, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia).
- JANTZEN, J. (2006). *The economic value of natural and environmental resources. Background document training*. Recuperado de <http://www.i-tme.nl/pdf/assessment%20of%20econ%20value%20of%20environment%20final.pdf> Linares P. (2008). Economía y medio

- ambiente: herramientas de valoración ambiental. En C. Romero (Ed.), *Tratado de tributación ambiental* 3. (pp. 1189-1225). Madrid, España: Thomson-Aranzadi.
- MENDIETA, J. C. (1999). *Manual de valoración económica de bienes no mercadeables*. Documento CEDE (Centro de Estudios para el Desarrollo Económico). Bogotá: Universidad de Los Andes.
- MORENO, V., GARCÍA, J. F., & VILLALBA, J. C. (2002). *Descripción general de los humedales de Bogotá*. Bogotá: Sociedad Geográfica de Colombia–Academia de Ciencias Geográficas.
- RIERA, P. (1994). *Manual de valoración contingente*. Recuperado de <http://herzog.economia.unam.mx/profesores/blopez/valoracion-manual.pdf>
- RUSSI D., TEN BRINK P., A. FARMER, et ál. (2013). La economía de los ecosistemas y la biodiversidad de agua y humedales. Resumen ejecutivo. Recuperado de http://archive.ramsar.org/pdf/TEEB/TEEB_WaterWetlands_ExecSum_2013-SP.pdf
- SECRETARÍA DE LA CONVENCION RAMSAR. (2013). *El manual de la convención de ramsar: guía a la convención sobre los humedales*. Recuperado de <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-sp.pdf>
- TIETENBERG T. (2006). *Environmental and natural resource economics*. Boston, EE.UU.: Pearson.
- UNEP. (2012). *The future we want. Outcome document of the united nations conference on sustainable development (rio+20)*. Recuperado de <http://www.un.org/en/sustainablefuture>

CAPÍTULO 2

Formulación y análisis de la percepción comunitaria en dos humedales del Distrito Capital

Ángela P. Hurtado-Moreno

La interacción de las sociedades con su entorno ha sido considerada como tema de gran importancia en las agendas internacionales para el desarrollo social en procura de la conservación de la naturaleza (MEA, 2005). Estas interacciones pueden ser entendidas desde los bienes y servicios ambientales (BSA) que brindan los ecosistemas y cómo estos permiten el bienestar humano en diferentes niveles (Tengberg et ál., 2012).

La Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA, por sus siglas en inglés) agrupa los BSA en cuatro categorías, que corresponden a características intrínsecas de los ecosistemas, que son aprovechados por la sociedad: servicios de mantenimiento, provisión, regulación y culturales-recreacionales. Es importante mencionar que las actividades antrópicas de aprovechamiento ecosistémico en cualquier categoría influyen directamente en la estabilidad de los recursos naturales.

Como se mencionó en el capítulo 1, para poder entender la disposición a pagar (DAP) de los agentes por los bienes ambientales es preciso conocer su percepción frente a estos. En este sentido, las encuestas proporcionan una herramienta que permite entender la valoración subjetiva de los ecosistemas a valorar. Para las características de diversidad de la comunidad, se estructura y aplica una encuesta semiestructurada, que permite la recolección de información

proveniente de la comunidad frente a la percepción y uso de los servicios ambientales directos e indirectos que ofrecen los humedales. Las encuestas aquí presentadas permiten inferir las características socioeconómicas, percepción y relación de los habitantes con un entorno natural.

Los humedales son ecosistemas de gran importancia para la mitigación y adaptación al cambio climático global (Kusler et ál. 1999) principalmente por sus propiedades hídricas y por albergar especies con alto valor de conservación. A estos atributos biofísicos se suma la importancia de salvaguardar el patrimonio humano, cultural e inmaterial, ya que están asociados a diferentes cosmovisiones, ritos, creencias religiosas e interacciones de sociedades ancestrales que unifican y articulan los valores sociales con los valores ecosistémicos (Ramsar, 1971).

Si bien los humedales urbanos y periurbanos de la ciudad de Bogotá, se encuentran amparados por la normatividad ambiental vigente, son muchos y diversos los problemas que afrontan (DAMA, 2006). Entre las afectaciones generadas por actividades antrópicas que históricamente se han presentado en el Parque Ecológico Distrital de Humedal —PEDH— La Conejera y Capellanía se encuentran las conexiones erradas, por medio de las cuales se vierten en los humedales aguas residuales; la disposición inadecuada de residuos sólidos que afecta tanto la belleza paisajística del lugar como el bienestar de los ciudadanos por la proliferación de vectores, y el cambio en la composición, estructura y función de los suelos y las redes hídricas que conllevan al aumento en el riesgo de inundaciones, entre otras (DAMA, 2006).

Se entiende que muchas de estas problemáticas se deben no solo a la gestión pública y privada, que en el oficio de sus deberes deben asegurar la calidad de estos bienes públicos, sino que también son ocasionadas por el actuar diario de los ciudadanos, por lo que es importante tener en cuenta los aspectos históricos y sociales que durante años han tejido los lazos de los pobladores locales y su visión frente a los recursos naturales que ofrece cada humedal.

Diseño de la encuesta

La encuesta está conformada por tres secciones¹: la primera sección captura información de las características socioeconómicas del encuestado y su relación con el humedal, caracterización familiar y de construcción comunitaria. Con respecto a las categorías de la relación del entrevistado con la comunidad, se realizó una encuesta que incluye a residentes, trabajadores no residentes, transeúntes y visitantes, siguiendo lo consignado en el Plan de Ordenamiento

1 Para el detalle del formulario completo de la encuesta, ver el anexo 1.

Territorial —POT— vigente (Decreto Distrital 190 de 2004), que concibe a los PEDH como espacios que promueven la recreación pasiva. Entendiendo que los humedales deben ofrecer espacios para la cultura, la educación y el goce de la belleza paisajística de la zona, el hecho de incluir a los transeúntes y visitantes puede brindar información sobre cómo conciben el entorno natural que hace parte de la ciudad en la que habitan.

Para el grupo de residentes, se incluyó la pregunta: ¿reconoce usted un humedal? Lo anterior busca conocer si el entrevistado está relacionado con el concepto de humedal o si en su opinión, este no se diferencia de potreros u otras zonas verdes de la zona en la que vive, labora o transita.

Teniendo en cuenta que el trabajador no residente hace uso y puede verse afectado de manera positiva o negativa por los diferentes escenarios en los que se encuentre el humedal, se estructura un apartado para cuestionar sobre la actividad comercial y la relación de esta con el humedal. Así mismo, se indaga por la disposición del trabajador no residente de ser un participante activo en lo relacionado al humedal. En cuanto al uso del humedal como un escenario público de recreación, donde la belleza paisajística juega un papel importante, se cuestiona al transeúnte sobre cómo se siente como visitante de la zona, para recolectar información sobre la calidad del recurso, el paisaje, la recreación y la cultura que brindan los humedales a la sociedad.

Tabla 1. Valores de uso activo relacionados con regulación y existencia

Regulación	Existencia
Recarga y descarga de acuíferos	¿Cree que las afectaciones a este humedal pueden repercutir en otros ecosistemas de la ciudad? ¿Cree usted que las condiciones de este humedal influyen en los flujos hídricos de ríos y quebradas de la ciudad de Bogotá?
Prevención de inundaciones	A consideración propia, el humedal es un escenario que: <ul style="list-style-type: none"> – Puede propiciar inundaciones en la zona – Evita las inundaciones en la zona
Regulación del clima	A consideración propia, el humedal es un escenario que: <ul style="list-style-type: none"> – Ayuda a la mitigación del cambio climático
Prevención de plagas	A consideración propia, el humedal es un escenario que: <ul style="list-style-type: none"> – Pone en riesgo la salud de la comunidad por presencia de plagas – Es un foco de propagación de enfermedades

Fuente: elaboración propia.

La segunda parte de la encuesta fue diseñada con base en a los reportes de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio y la Convención de Ramsar, en lo concerniente a los servicios ambientales que suministran los humedales a la

sociedad. Dentro de las preguntas formuladas, se buscó identificar diferentes tipos de servicios ambientales: de uso activo, en los cuales se evalúan los servicios de regulación y existencia (tabla 1); herencia de procesos ecológicos brindados por los humedales para futuras generaciones (tabla 2), en los cuales están reflejados la prevención de inundaciones, regulación climática y prevención de plagas, entre otros. Por medio de una revisión bibliográfica se lograron establecer los servicios ambientales que por múltiples condiciones son propios de los PEDH de Bogotá. La tabla 1 relaciona las catorce preguntas con el servicio ambiental asociado en el desarrollo de la encuesta.

Como se presenta en el anexo 1, esta sección de la encuesta reúne preguntas mixtas de única y múltiple respuesta para capturar el porqué de la respuesta, lo que permitió no solo tener conocimiento en términos de indicadores cerrados (sí o no), sino que además permitió entender la razón por la cual el entrevistado responde a cualquiera de las opciones. Al incluir la casilla “Otro, ¿cuál?”, el investigador pudo ampliar la gama de opciones que al momento de la elaboración de la encuesta pueden no estar incluidas, lo que disminuirá el sesgo en los resultados y aportará un mayor entendimiento de la dinámica de la población en referencia al humedal.

Tabla 2. Valores de uso activo relacionadas con mantenimiento

Regulación	Existencia	Herencia
Hábitat de especies endémicas y en CR	¿Sabía usted que en los humedales de Bogotá habitan aves en peligro crítico de extinción que solo existen en la región andina colombiana y en ningún otro lugar del mundo?	¿Por favor mencione qué implicaciones traería la pérdida definitiva de estas especies para nuestros humedales?
Mantenimiento de polinizadores		
Hábitat de avifauna de importancia internacional	A los humedales de Bogotá arriban diferentes aves migratorias o viajeras estacionales, ¿cree que la llegada de estas aves aumenta el valor ecológico de los humedales?	
Retención de sedimentos y acumulación de materia orgánica		
Estructura de redes ecosistémicas del Distrito	¿Cree que las afectaciones a este humedal pueden repercutir en afectaciones a otros ecosistemas de la ciudad?	

Fuente: adaptado del cuestionario original del trabajo de campo.

Además de los valores de uso activo, se incluyen preguntas relacionadas con los valores intrínsecos². Para analizar qué tanto las personas muestran apropiación del territorio se incluyó en la primera sección una pregunta sobre cuántas generaciones de su familia han vivido en el barrio. Luego, se presentan preguntas sobre la participación en actividades relacionadas con el humedal y qué tan activo es el entrevistado dentro de la comunidad donde habita, la tabla 3 resume las preguntas.

Tabla 3. Valores de usos directos, culturales y recreacionales

Por favor mencione de 0 a 3 qué tan deseable considera usted que sería el desarrollo de las siguientes actividades (donde 3 es el valor más deseable y 0 no deseable).	
Ecoturismo/ actividades de educación ambiental	<p>¿Se involucraría usted en actividades de conservación y uso sostenible del humedal (ej. ecoturismo - caminatas, observación de aves, educación ambiental, etc.)?</p> <ul style="list-style-type: none"> - Avistamiento de aves - Recreación pasiva
Identidad y significancia	¿Sabía usted que los humedales eran espacios sagrados para culturas ancestrales?
Belleza paisajística	
Sentido de identidad	<p>¿Cuáles son las principales actividades comunitarias y gubernamentales que deberían plantearse para la recuperación del humedal?</p> <p>¿Le gustaría que las próximas generaciones pudieran conocer este humedal? ¿Cómo cree que será el humedal en 10 años?</p>

Fuente: elaboración propia.

Inmediatamente después, la encuesta presenta las relaciones con escenarios de cambio, que permiten al encuestado relacionar cuatro escenarios hipotéticos de cambios en el humedal (escalas de pérdida o recuperación) con la variación de bienes y servicios o elementos característicos de los humedales, como se evidencia en la tabla 4. Esta parte de la encuesta reúne doce preguntas que serán comunes para todos los grupos entrevistados: se indaga sobre el uso y valoración de los BSA en cada humedal, poniendo a consideración del entrevistado la realidad actual del humedal y lo que podría pasar en diferentes escenarios de cambio hipotéticos que este podría afrontar (MEA, 2003).

Al final de la encuesta, se presenta una pregunta que busca obtener información sobre el valor económico que la población estaría dispuesta a pagar para la recuperación y manejo de los servicios ambientales, o para recibir compensación por el deterioro de los mismos, es decir, se estructuró la encuesta de

² Para detalle sobre este concepto ver el capítulo 1.

manera tal que se pueda aplicar el método de valoración contingente (Cárdenas et ál., 2013), para obtener una valoración económica en escenarios hipotéticos.

Tabla 4. Relaciones con escenarios de cambio del humedal

	Escenarios hipotéticos de cambios en el humedal											
	Pérdida parcial			Pérdida total			Recuperación parcial			Recuperación total		
	+	-	=	+	-	=	+	-	=	+	-	=
El número de aves												
La propagación de enfermedades												
El riesgo de inundaciones												
La belleza paisajística												
La variedad de plantas												
La proliferación de roedores												
La seguridad social												

Para los cuatro escenarios (pérdida y recuperación) de cambio en el humedal, mencione en cada casilla si la característica en mención aumenta (+), disminuye (-) o permanece igual (=)

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La encuesta semiestructurada incluyó preguntas abiertas y de selección múltiple con miras a entender la percepción comunitaria de dos humedales urbanos y periurbanos de la ciudad de Bogotá. Este instrumento no solo permitió caracterizar a la población e identificar el conocimiento del encuestado acerca de cada humedal, sino que también proporcionó un valor informativo en términos de las funciones de los ecosistémicas de los PEDH Capellanía y La Conejera.

Teniendo en cuenta que cada ecosistema cuenta con una realidad territorial diferente, se recomienda para futuras investigaciones ajustar este instrumento a las condiciones particulares del territorio; para ello, los criterios internacionales aquí sugeridos —como MEA y la Convención de Ramsar— pueden proporcionar

una ruta estándar sobre los bienes y servicios ecosistémicos que se pueden incluir dentro del cuestionario.

Las preguntas de escenarios hipotéticos al igual que las preguntas de usos directos, además de evidenciar si los ciudadanos perciben un beneficio del entorno, pueden aportar un componente de pedagogía ambiental, pues al terminar la encuesta los ciudadanos pueden contar con mayor información acerca de los potenciales beneficios que está obteniendo del ecosistema y los riesgos derivados de un inadecuado manejo; en caso de ser personas que no residen cerca al humedal, por ejemplo un trabajador no residente, las preguntas pueden incentivar la participación de los ciudadanos en iniciativas de conservación y preservación del medio natural.

Por último, este instrumento puede brindar un punto de inicio para los tomadores de decisiones en la promoción de una gobernanza ambiental efectiva, que involucre y empodere a las comunidades locales como gestores y principales beneficiarios de sus territorios.

Referencias

- Bogotá, Alcaldía Mayor. Decreto Distrital 190 de 2004, Plan de Ordenamiento Territorial (POT) (junio 2004).
- Booth, D. B. (1991). Urbanization and the natural drainage system—impacts, solutions, and prognoses. *Northwest Environmental Journal*, 7, 93–118.
- Barbier, (1994). Valuing environmental functions: tropical wetlands. *Land Economics*, 70(2), 155–173.
- Bin, O., & S. Polasky. (2004). *Evidence on the amenity value of wetlands in a rural setting*. Greenville, NC: East Carolina, University.
- Boyer, T., & Polasky, S. (2004). Valuing urban wetlands: a review of non-market valuation studies. *Wetlands, the Society of Wetland Scientists*, 24(4), 744–755.
- Cárdenas, J. C., Castañeda, J. L., Castillo, D., et ál. (2013). *Métodos complementarios para la valoración de la biodiversidad: una aproximación interdisciplinaria*. Bogotá: Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Universidad de los Andes.
- Bogotá, Alcaldía Mayor & Departamento Administrativo del Medio Ambiente —DAMA—. (2006). *Política de Humedales del Distrito Capital*. Recuperado de http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=b3186a1c-c2a6-4cae-8e85-3aeefee4fb7&groupId=55886
- De Groot, R. S., Stuij, M. A. M., Finlayson, C. M., & Davidson, N. (2006). *Valuing wetlands: guidance for valuing the benefits derived from wetland ecosystem services. Technical Report No. 3/CBD*. Recuperado de <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-27.pdf>
- Fundación Humedal La Conejera —FHLC— (1993-2010). *Gestión Ambiental Participativa para la Defensa y Recuperación del Humedal La Conejera y los ecosistemas de su Microcuenca*. Recuperado de [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=oahUKEWjGxd6hk_DbAhWNRfKkHUqZANwQFggnMAA&url=http%](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=oahUKEWjGxd6hk_DbAhWNRfKkHUqZANwQFggnMAA&url=http%3F)

- 3A%2F%2Fredcolombianafa.org%2Fapc-aa-files%2F1611c317ca4b218aco3d71b8efb638cd%2FPresentaci%25F3n%252oMicrocuenca%252oCongreso%252oAmbiental.pdf&usg=AOvVawoF1dlacTHifB5Fu5-T63A6
- Brander, L. , Florax, R., & Vermaat, J. (2006). The empirics of wetland valuation: a comprehensive summary and a meta-analysis of the literature. *Environmental and Resource Economics*, 3(2), 223 –250.
- Kusler J, Brinson M, Niering W, Patterson J, Burkett V, Willard D (1999) Wetlands and climate change: scientific knowledge and management options. White Paper Institute for Wetland Science and Public Policy. Association of Wetland Managers/Wetland International, Berne
- Mahan, B. L., Polasky, S., & Adams, R. (2000). Valuing urban wetlands: a property price approach. *Land Economics*, 76(1), 100 -113.
- Millennium Ecosystem Assessment (2003). *Ecosistemas y bienestar humano: marco para la evaluación*. Recuperado de <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.3.aspx.pdf>
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis*. Recuperado de <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf>
- Ramsar, (1971). *Documento informativo Ramsar No. 1. ¿Qué son los humedales?* Recuperado de <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/info2007sp-01.pdf>
- Russi, D., ten Brink P., Farmer A., et ál. (2013). *The economics of ecosystems and biodiversity for water and wetlands*. Recuperado de http://doc.teebweb.org/wp-content/uploads/2013/04/TEEB_WaterWetlands_Report_2013.pdf

Anexo 1. Formato único de encuestas

FECHA				
PEDH	LA CONEJERA			CAPELLANÍA
EVENTO				
BARRIO				
E-MAIL				
ENCUESTADOR				

CARACTERIZACIÓN SOCIAL	
Género	F <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/>
Edad	
Estado civil	
Lugar de procedencia	
Nivel de educación	

Relación Del Entrevistado Con La Comunidad		
A Residente <input type="checkbox"/>	B Trabajador NO residente <input type="checkbox"/>	C Visitante <input type="checkbox"/>
OTRO <input type="checkbox"/>	¿CUÁL? <input type="text"/>	

IDENTIFICACIÓN DEL ENTORNO

1. ¿Reconoce usted un humedal?

SI

NO

2. Según su criterio, un Humedal es:

Un bien público	<input type="checkbox"/>
Una problemática del entorno	<input type="checkbox"/>
Un recurso natural	<input type="checkbox"/>
Un bien de importancia cultural	<input type="checkbox"/>
Un pastizal	<input type="checkbox"/>
Agua estancada	<input type="checkbox"/>
¿Otro/Cuál?	<input type="text"/>

3. El principal medio de comunicación informativo que usted utiliza es:

	¿Cuál?
Periódicos nacionales	<input type="checkbox"/>
Redes sociales	<input type="checkbox"/>
Boletines Locales	<input type="checkbox"/>
Radio	<input type="checkbox"/>
Internet	<input type="checkbox"/>
Otro/Cuál?	<input type="text"/>

A RESIDENTE - Caracterización familiar

a.1 ¿Cuántas personas incluido usted conforman su hogar?

Niños

Adultos

a.2 ¿Cuántas generaciones de su familia han residido en este barrio?

Continúa

Núcleo familiar	<input type="text"/>
Padres	<input type="text"/>
Abuelos	<input type="text"/>
Bisabuelos	<input type="text"/>

a.3 Su vivienda es propia Arrendada Otro

A RESIDENTE - Construcción comunitaria

a.4 En una escala de 1 a 5 por favor mencione qué tanto le afectan los siguientes aspectos (5 es el valor más alto):

Habitantes de la calle	<input type="text"/>
Expendio de drogas	<input type="text"/>
Robos	<input type="text"/>
Enfermedades	<input type="text"/>
Proliferación de roedores	<input type="text"/>
Inundaciones	<input type="text"/>

a.5 ¿Por cuál de las siguientes razones las personas de su barrio participarían o no en la recuperación del humedal?

Por apropiación de su territorio	<input type="text"/>
Porque puede repercutir en su calidad de vida	<input type="text"/>
Por desinterés	<input type="text"/>
Por inconformidad frente a la existencia del humedal	<input type="text"/>
OTRO/¿Cuál?	<input type="text"/>

a.6 En qué actividades ha participado junto con la comunidad para la recuperación y mantenimiento del humedal en el último año:

Talleres, foros, mesas de trabajo, Juntas de Acción comunal	<input type="text"/>
Jornadas para la recolección de basuras	<input type="text"/>
Jornadas de siembra y/o poda	<input type="text"/>
Interposición de quejas u otros ante las autoridades competentes	<input type="text"/>
OTRO/¿CUAL?	<input type="text"/>
Ninguna	<input type="text"/>

a.7 En relación con los productos que pueden brindar los humedales, por favor indique cuál de estos usa usted, su familia

Productos vegetales (como frutos, leña entre otros)	<input type="text"/>
Agua para el consumo	<input type="text"/>
Agua para riego	<input type="text"/>
Otro	<input type="text"/>
¿Cuál?	<input type="text"/>

B TRABAJADOR NO RESIDENTE

b.1 ¿Cree usted que la calidad ambiental del humedal puede afectar su actividad comercial?

SI NO

¿Por qué?

- b.2** Dado que usted, en calidad de comerciante, hace parte de esta comunidad, ¿le gustaría vincularse de alguna manera en actividades para la recuperación y/o mantenimiento del humedal?

SI

NO

¿Por qué?

PERCEPCIÓN DE LOS BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES ASOCIADOS AL HUMEDAL

3. En cuanto a los recursos naturales presentes en el humedal, por favor mencione ¿cuáles cree que benefician a la comunidad y en general a todos como ciudadanos?

4. ¿Qué afectaciones reconoce usted que afronta el humedal hoy en día?

5. En una escala de 1 a 5 (donde 5 es el más alto valor), ¿Qué tan deteriorado considera que se encuentra el humedal?

1-5

6. ¿Cree que las afectaciones a este humedal pueden repercutir en afectaciones a otros ecosistemas de la ciudad?

SI

NO

¿Por qué?

7. Cómo se podría ver afectado (a) usted y las personas de su barrio de manera negativa o positiva si:

a. Desapareciera TOTALMENTE este humedal

b. Se recuperara TOTALMENTE este humedal

8. ¿Qué actividades considera usted que pueden desarrollarse en este humedal para mejorar su calidad de vida la de los ciudadanos en general?

Obras de Infraestructura (vivienda, vías fábricas, etc.)	<input type="checkbox"/>
Pastoreo de ganado	<input type="checkbox"/>
Actividades que aseguren el regreso y mantenimiento de la Fauna	<input type="checkbox"/>
Siembra de plantas (Reforestación)	<input type="checkbox"/>
Recreación pasiva (avistamiento de aves, caminatas ecológicas,	<input type="checkbox"/>

OTRA/¿CUÁL?

Continúa

9. ¿Cómo le gustaría que fuera el humedal en 10 años?

Disposición a pagar

10. ¿Estaría dispuesto a contribuir mensualmente con un aporte para recuperar TOTALMENTE el humedal?

SI

NO

En caso afirmativo, ¿de cuánto sería el aporte?

C VISITANTE

c.1 ¿Le gustaría vivir en alguno de los barrios que rodean este humedal?

SI

NO

POR QUÉ

c.2 En una escala de 1 a 5 por favor mencione qué tan a gusto se siente transitando por esta zona (5 es el valor más alto):

1-5
Le es indiferente
¿POR QUÉ?

7. Según su criterio, Cómo se podrían ver afectados usted y en general los bogotanos de manera negativa o positiva si:

a. ¿Desapareciera TOTALMENTE este humedal?

b. ¿Se recuperara TOTALMENTE este humedal?

8. ¿Qué actividades considera usted que pueden desarrollarse en este humedal para mejorar la calidad de vida de los Bogotanos?

Obras de Infraestructura (vivienda, vías fábricas, etc.)	<input type="checkbox"/>
Pastoreo de ganado	<input type="checkbox"/>
Siembra de plantas (Reforestación)	<input type="checkbox"/>
Recreación pasiva (avistamiento de aves, caminatas ecológicas,	<input type="checkbox"/>
OTRA/¿CUÁL?	<input type="text"/>

CAPÍTULO 3

Métodos de valoración de calidad de suelos, agua y aire

Óscar Lombana Charfuelán

Para realizar un análisis de las condiciones fisicoquímicas de un ecosistema es importante la medición del estado de los componentes del suelo, el agua y el aire. De esta manera, se pueden determinar los impactos directos de la intervención humana en las funciones del ciclo de nutrientes, de recarga de acuíferos y de las propiedades de diversidad biológica (Barbier, Acreman & Knowler, 1997).

Un adecuado diagnóstico de la geología del suelo y los sustratos, así como mediciones directas de temperatura, turbidez, pH, color, salinidad, gases disueltos, nutrientes disueltos o suspendidos, carbono orgánico disuelto y conductividad en el agua, buscan generar un panorama general del estado actual de dichos ecosistemas (Ramsar, 2010). En este contexto, el presente capítulo presenta una revisión de las principales metodologías de medición de parámetros de suelos, agua y aire.

Parámetros de análisis en suelos

En el recurso suelo se tienen en cuenta parámetros físicos como textura y porosidad, características químicas como materia orgánica, pH, contenido de carbonato de calcio, disponibilidad de elementos nutritivos para las plantas¹ y contenido de sales solubles (Aguilo et ál., 2004). La medición del pH condiciona

¹ Macronutrientes: hidrógeno, carbono, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Micronutrientes: sodio, hierro, aluminio, silicio, cobre, molibdeno y zinc.

la correcta absorción de los nutrientes desde la solución del suelo. Por ejemplo, el aluminio y el manganeso son más solubles en la solución del suelo a un pH bajo, lo que ocasiona intoxicación en las plantas. La textura, por su parte, indica el contenido relativo de partículas de diferentes tamaños tales como la arena, el limo y la arcilla en el suelo². Además, la textura se relaciona con la fertilidad del suelo, la cantidad de agua y la velocidad con que esta penetra en el suelo. De tal manera que los suelos de textura predominantemente arenosa tienen una baja fertilidad; suelos con una proporción equilibrada de arena, limo y arcilla, y materia orgánica abundante son fértiles, y los suelos dominados por arcillas tienen una alta fertilidad, pero se encharcan con facilidad (Stocking & Murnaghan, 2003).

Del mismo modo, es fundamental relacionar las principales sustancias consideradas como causantes potenciales de problemas de contaminación en los suelos como metales³, compuestos inorgánicos⁴ y compuestos aromáticos y poliaromáticos⁵ (Tosse, 2003). Estos están relacionados en su mayoría con el crecimiento de plantas y vegetación, es decir, indican las condiciones sobre las cuales se desarrolla la flora del ecosistema. En primer lugar, se encuentra la capacidad de intercambio catiónico (CIC), que es básicamente la cantidad de cationes que un suelo puede retener (expresado en miliequivalentes (meq)/100 g de suelo).

La determinación de este parámetro involucra los siguientes cationes: calcio, magnesio, potasio y sodio, que corresponden a los nutrientes directamente relacionados con el crecimiento de las plantas. Estos cationes pueden ser también determinados de manera independiente. Así como los otros cationes intercambiables de cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn) puesto que cada uno contribuye en los procesos de las plantas: el Zn interviene en la formación de las hormonas y las proteínas que afectan el crecimiento; el Fe es un constituyente de algunas proteínas y enzimas, en la formación de la clorofila y en los procesos de oxidación y reducción; el Mn participa en el aprovechamiento del nitrógeno y actúa en la reducción de los nitratos, y Cu el funciona como catalizador para la respiración y es constituyente de las enzimas en el metabolismo de carbohidratos y la síntesis de proteínas.

La acidez intercambiable se refiere a la cantidad de $Al^{3+}+H^+$ en diferentes proporciones en el suelo. Una alta concentración de Al^{3+} genera toxicidad para las plantas, que repercute en un efecto negativo sobre las propiedades químicas del suelo como solubilización, disponibilidad y absorción de nutrimentos;

2 Si alguna de estas partículas predomina se trata de un suelo arenoso, cenagoso o arcilloso, respectivamente, la proporción que suele encontrarse es 40% limo, 40% arena y 20% arcilla (Nebel y Wright, 1999).

3 Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Ba, Hg, Pb

4 NH_4^+ , F total, CN⁻ total, S₂⁻ total, Br, PO_4^{2-}

5 Hidrocarburos colorados y agroquímicos.

físicas como estructura y estabilidad de agregados, y biológicas como tipos de organismos presentes en el suelo, lo que ocasiona una reducción en el crecimiento de las raíces, lo cual afecta de forma negativa el crecimiento del cultivo. También reduce la calidad de las cosechas e induce deficiencias nutricionales de: Ca, Mg, P, S y Zn, entre otros (Oliva, 2009).

El análisis de la conductividad eléctrica (CE) en suelos se hace para establecer si las sales solubles se encuentran en cantidades suficientes para afectar la germinación normal de las semillas, el crecimiento de las plantas o la absorción de agua por parte de las mismas. Se debe tener en cuenta el carbono orgánico, en relación directa con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo, debido a que aporta elementos como el nitrógeno. El fósforo disponible es esencial para el crecimiento de las plantas, debido a su participación en los procesos metabólicos como la fotosíntesis, la síntesis y degradación de carbohidratos. El boro disponible se relaciona con el transporte de los azúcares en la planta que afecta la fotosíntesis y la síntesis de proteínas, e interviene en el proceso de floración y formación del sistema radicular. El azufre disponible es esencial para las plantas al ser un componente básico de las proteínas, sin él habría inhibición de las mismas; además, está presente en los procesos de absorción, mineralización, oxidación y reducción.

Finalmente, se encuentra la determinación de las cantidades de metales pesados como Cr, Pb, Hg, Cd, As. Existen dos tipos, los de origen geogénico, que proceden de actividad volcánica o de lixiviación de los minerales, y los de origen antropogénico, que derivan de residuos peligrosos provenientes de la actividad del hombre en la industria, la minería y la agricultura, entre otras; cuando las concentraciones de estos metales pesados sobrepasan ciertos límites permitidos, se dice que el suelo se encuentra contaminado.

Análisis físico-químico de suelos

Los tipos de análisis en suelos son clasificados por Cuesta y Villaneda (2005) como se especifica en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de análisis de suelos

Nombre	Análisis reportados
Caracterización	Textura, materia orgánica (MO), pH, Ca, Mg, K, Na
Elementos menores (EM)	Fe, Cu, Zn, Mn, Boro
Salinidad parcial	Conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de sodio de intercambio (PSI)
Análisis completo	Caracterización, EM, CE y S

Fuente: Cuesta y Villaneda (2005).

Estos autores indican que para el diagnóstico de la fertilidad de los suelos y la determinación de las necesidades de nutrimentos de las plantas se han utilizado varias técnicas, entre las cuales se destacan los siguientes análisis: i) suelos; ii) tejidos vegetales; iii) síntomas de deficiencia de nutrientes de la planta, y iv) ensayos de invernadero o de campo. Adicionalmente, mencionan que el diagnóstico químico se utiliza para evaluar la capacidad del suelo de suministrar nutrientes a la planta y diagnosticar deficiencias y/o toxicidades.

Tabla 2. Interpretación de resultados de análisis de suelos

pH	Clasificación	Observación	
< 5.5	Fuerte a extremadamente ácido	Posibles deficiencias de P, Ca, Mg y Mo.	
5.5-5.9	Moderadamente ácido	Baja solubilidad de P y regular disponibilidad de Ca y Mg.	
6.0-6.5	Ligeramente ácido	Condiciones adecuadas para el crecimiento de la mayoría de los cultivos.	
6.6-7.3	Casi neutro o neutro	Buena disponibilidad de Ca y Mg. Moderada disponibilidad de P y baja disponibilidad de micronutrimentos con excepción de Mo.	
7.4-8 > 8	Alcalino Muy alcalino	Posible exceso de carbonados. Baja solubilidad de P y de micronutrimentos con excepción de Mo. Se inhibe el crecimiento de varios tipos de cultivos.	
Materia orgánica (%)	Bajo	Medio	Alto
Frío	< 5	5-10	> 10
Templado	< 3	3-5	> 5
Cálido	< 2	2-3	> 3
CIC (meq/100 g)	< 10	10-20	> 20
Bases intercambiables (meq/100 g)	Bajo	Medio	Alto
Ca	< 3	3-6	> 6
% Saturación	< 30	30-50	> 50
Mg	< 1.5	1.5-2.5	> 2.5
% Saturación	< 15	15-25	> 25
K	< 0.20	0.20-0.40	> 0.40
% Saturación	< 2	2-3	> 3
Otros (mg/kg)	Bajo	Medio	Alto

P	< 20	20-40	> 40
B	< 0.2	0.2-0.4	> 0.4
Fe	< 25	25-50	> 50
Cu	< 2	2-3	> 3
Mn	< 5	5-10	> 10
Zn	< 1.5	1.5-3	> 3
S	< 10	10-20	> 20
CE (dS/m)	0-2	No salino	
	3-4	Ligera salinidad	
	4-8	Moderado	
	8-15	Fuerte	
	> 15	Muy Fuerte	

Fuente: Cuesta y Villaneda, (2005).

Es relevante hacer algunas aclaraciones. Inicialmente, un pH igual o inferior a 5.7 indica que el contenido de bases es muy bajo, solo si el contenido de materia orgánica es igualmente bajo, por tanto, se tendrán posibles deficiencias de Ca, Mg, fosfatos, Mo y B. De igual manera, esta condición de pH puede provocar ciertas toxicidades como las de Mn, Zn, Al y Fe, entre otras. Por su parte, valores altos de pH ocasionan desbalances de Mg.

Por otro lado, el contenido de materia orgánica (MO) en los suelos colombianos, generalmente aumenta con la altitud; los suelos tipo bog⁶ consisten principalmente de MO, que mejora las propiedades físicas del suelo, es decir, aumenta la retención de agua y disminuye las pérdidas por lixiviación. El efecto de la MO sobre el pH del suelo es aumentar la capacidad amortiguadora, en consecuencia, la presencia de MO disminuye la tendencia de cambio del pH del suelo cuando se agregan materiales ácidos o básicos (Ortiz, s.f.).

Por su parte, la CIC representa el número total de posiciones intercambiables de la fracción coloidal del suelo. Esta es mayor en suelos de textura fina; la CIC en suelos arcillosos es mayor que en los arenosos, aunque en algunos casos la MO puede compensarlo. En Colombia los suelos tienen una CIC variable aun dentro de la misma región.

En cuanto a las bases intercambiables (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ y Na⁺), es importante la relación Ca/Mg. Cuando el suelo es deficiente en Mg, esta relación se hace

6 Conocidos como suelos de turba (*peat soils*), suelos de humus (*muck soils*), suelos de tierra esponjosa (*bog soils*) o suelos orgánicos (*organic soils*).

muy amplia y se eleva el pH. Es deseable que los suelos tengan una CIC alta asociada con elevada saturación de bases, ya que esto indica una gran capacidad potencial para suministrar Ca, Mg y K a las plantas. Aguilo et ál. (2004) enfatizan que la capacidad de intercambio del suelo depende de la textura y el pH del suelo, por ende, está relacionada con el porcentaje de arcilla y de MO. También muestran valores promedio de la CIC según la naturaleza del suelo así: suelos arenosos, 10 meq/ 100 g; suelos francos, 15 meq/100 g, y suelos arcillosos, 20 meq/ 100 g. Por lo anterior, el contenido de Na (meq/100g) debe ser menor a 1, el porcentaje de saturación menor a 15 y la relación normal Ca: Mg: K es 3:1:0.25 (Baquero, s.f., p. 12). De este modo, Chaves (2012) presenta niveles críticos para la interpretación de las relaciones catiónicas Ca: Mg: K que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Niveles críticos de las relaciones catiónicas

Relación	Desbalance	Balance	Desbalance
Ca/Mg	< 2	2-5	> 15
Ca/K	<5	5-25	> 25
Mg/K	< 2.5	2.5-15	> 15
(Ca+Mg) /K	< 10	10-40	> 40

Fuente: Chaves (2012).

Al mismo tiempo, los niveles críticos de fósforo en la mayoría de los cultivos son considerados como bajos cuando son menores a 15 mg según Ortiz (s.f.) y, por el contrario, se consideran altos cuando son mayores a 15. Estas clasificaciones están basadas en la probabilidad de respuesta a la adición de fertilizantes fosfóricos; los suelos clasificados como bajos tienen una mejor respuesta que los altos.

De la misma forma ocurre con el contenido de otro elemento: el potasio. Para la mayoría de los cultivos concentraciones menores a 0.15 me/100 g, son consideradas como nivel bajo y concentraciones mayores como alto. De este modo, los cultivos con un sistema de raíces débiles pueden sufrir por falta de potasio, mientras que plantas bien desarrolladas pueden obtener el K que necesitan, aunque los suelos sean más pobres.

La salinidad en los suelos se puede cuantificar a partir de la CE, que cuando es elevada indica un aumento en la concentración de sales, mientras que una conductividad baja es muestra de que la velocidad de movilización de los nutrientes es baja o que algunos de estos pueden estar ausentes⁷. Pocas plantas pueden crecer cuando la CE está entre 8 y 12 (tomates resistentes), en condiciones

⁷ Los cationes salinos pueden ser: Na, Ca, Mg y K, y los aniones: sulfatos, cloruros y nitratos.

de CE superiores a 12 también son muy pocos los cultivos que pueden resistir (p.e. remolacha, palma datilera y algodón), en suelos sumamente salinos, con CE superior a 18 solo pueden subsistir algunos pastos y malezas (Ortiz, s.f.). Los suelos afectados por sales se pueden clasificar como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de suelos afectados por sales

Tipo de suelo	Conductividad	Porcentaje de Na	Observación
Salino	> 4	< 15	Generalmente pH < 8.5
Salino sódico	> 4	> 15	En algunas ocasiones contienen yeso.
Sódico	< 4	> 15	Contienen suficiente Na.
Normal	< 4	< 15	
	Específica del extracto de saturación a 25°C miliOhm/cm	Intercambiable me/100g	Interfiere en el crecimiento de las plantas, pero no contienen exceso de sales solubles.

Fuente: Ortiz

Índices de calidad del suelo

El uso del término calidad del suelo (cs) generalmente se asocia con la aptitud de los suelos para un uso específico, que incluye un componente inherente, determinado por las propiedades físicas y químicas del mismo, dentro de las limitaciones establecidas por el clima y el ecosistema. Por su parte, el término salud del suelo se utiliza en un sentido más amplio para indicar la capacidad del suelo de funcionar como un sistema vivo y dinámico idóneo para sostener la productividad biológica y mantener la salud de plantas y animales (Doran & Zeiss, 2000).

Herrick (2000), por su parte, afirma que la calidad del suelo refleja la capacidad de este para sostener la productividad vegetal y animal, mantener o mejorar la calidad del agua y del aire, y promover la salud de las plantas y los animales. Por tanto, para evaluar la calidad del suelo se han desarrollado, según Karlen, Ditzler, y Andrews (2003), diferentes herramientas (de indexación a diversas escalas) para mostrar las múltiples funciones como nutrientes y agua de ciclo, de filtrado y amortiguadores de contaminantes, descomposición de residuos de cultivos y otras fuentes de Mo y reciclaje de nutrientes esenciales para las plantas, entre otros.

Adicionalmente, la evaluación de la calidad del suelo hace hincapié en las propiedades y procesos inherentes y dinámicas del mismo. La clasificación del suelo tradicional y la interpretación se basan casi exclusivamente en las

características inherentes determinadas por sus factores básicos: el clima, el material parental, el tiempo, la topografía y la vegetación (Jenny, 1941 citado por Karlen et ál., 2003). En contraste, según Doran y Zeiss (2000) los criterios para los indicadores de calidad y salud del suelo se refieren principalmente a su utilidad en la definición de procesos de los ecosistemas y la integración física, química y biológica. En consecuencia, la calidad del suelo debe cumplir con los siguientes cinco criterios:

- Sensibilidad a las variaciones
- Buena correlación con las funciones benéficas del suelo (servicios del ecosistema)
- Útil para dilucidar los procesos del ecosistema (función beneficiosa)
- Comprensible y útil
- Fácil y barato de medir

De este modo, los indicadores potenciales de calidad del suelo podrían ser la capacidad de absorción de fósforo y la CEC; el cambio en el contenido de MO; la densidad aparente; la retención de agua; la rugosidad aleatoria; la porosidad; la conductividad; la conductividad hidráulica y la conductividad hidráulica saturada; la productividad del suelo, y la profundidad de enraizamiento (Larson & Pierce, 1991 citados por Karlen et ál., 2003). Adicionalmente, la MO es considerada un importante indicador de CS y sostenibilidad, la materia orgánica particulada (MOP) y el potencial de mineralizar nitrógeno⁸ —NPM— (Reeves, y Galantini y Suñer, citados por Roledo et ál., 2013).

En suelos de bajo cultivo agrícola, autores como Dalurzo y Toledo (citados por Roledo et ál., 2013) han efectuado estudios de CS, en los que determinaron como indicadores de calidad a los siguientes atributos del suelo: macro y microporosidad, densidad aparente, estabilidad de los agregados, MO, N total, MOP, P orgánico, capacidad de intercambio efectiva y actividad de la fosfatasa ácida. Otros atributos de la CS pueden estar relacionados con la actividad biológica como la respiración —RES— (Doran & Jones; Sarrantonio, citados por Roledo et ál., 2013).

Es de suma importancia la selección de los indicadores de calidad de suelos apropiados para supervisar con eficiencia y eficacia las funciones críticas del mismo —por ejemplo, el ciclo de nutrientes, la entrada de agua, la retención

8 Del mismo modo, se pueden establecer numerosos índices y relaciones vinculadas a la MO para evaluar la CS, entre ellos la relación MOP/MO; el índice de labilidad (IL), el índice de reserva de carbono (IRC), y el índice de manejo del carbono (IMC), el índice de estratificación del carbono orgánico del suelo (COS) y el índice de estratificación del NPM (Galantini; Blair & Franzluebbers, citados por Roledo et ál., 2013).

y liberación; apoyar el crecimiento y desarrollo de las plantas— (Karlen et ál., 2003). No obstante, Qi et ál. (2009) señalan que uno de los aspectos más limitantes de la evaluación de la CS es la falta de un método universalmente aceptable para la elaboración de índices de CS. En este aspecto, Shukla (citado por Roledo et al., 2013) indica que las propiedades físicas, químicas y biológicas pueden ser buenos indicadores de CS, aunque la mayoría no son universales, pues varían en función del ambiente y el tipo de suelo.

Por su parte, Bastida, Zsolnay, Hernández y García (2008) establecen que la falta de aplicación de los índices de calidad del suelo reside en: i) pobre estandarización de algunas metodologías; ii) algunos métodos están fuera de su alcance en algunas partes del mundo; iii) problemas de escala espacial (heterogeneidad del suelo); iv) pobre definición de las condiciones naturales del suelo (clima y vegetación), y v) pobre definición de la función del suelo a ensayar.

Suelos contaminados con metales pesados

Los metales pesados son elementos con densidad superior a 5 g/cm³, se pueden encontrar en los suelos de manera natural, generalmente en pequeñas cantidades, y pasan a ser tóxicos a partir de un determinado umbral de concentración (Díez & Camilotti citados por Saa, Rodríguez & Madriñán, 2011). Son clasificados en dos grupos: el primero corresponde a los micronutrientes esenciales para los organismos vivos (plantas, animales y humanos)⁹, que pueden producir efectos tóxicos cuando sobrepasan determinados niveles; el segundo lo componen aquellos que no presentan una función biológica conocida y que después de determinados niveles provocan disfunciones graves en los organismos, incluidos los seres humanos¹⁰ (Moolenaar et ál.; García & Dorronsoro; Granero & Domingo; Peris; Recatalá citados por Saa et ál., 2011).

Para la determinación de la contaminación por metales, se debe contar con valores de referencia de los mismos, por lo cual se han realizado diversos estudios para establecer los valores de fondo o de referencia (Saa et ál., 2011). Los criterios oficiales de la contaminación por metales pesados utilizados para evaluar la CS han sido establecidos en países como Holanda, España, Polonia y EE.UU., entre otros (tabla 5).

9 Elementos como Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni y Zn.

10 Elementos químicos como Cd, Pb, As y Hg.

Tabla 5. Valores de referencia de metales pesados en diferentes regiones (mg/kg)

Ciudad o País	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni
Holanda	85	0,80	36	140	100	35
Málaga – España	69	0,50	65	132	132	58
Brasil	17	0,50	35,10	59,90	40,20	13,20
Alicante - España	28	0,70	28	83	36	31,00
Tirana - Albania	85,5	0,70	36,30	151,00	113,70	41,90
China	37,5	0,43	31,70	117,70	58,90	27,50
Hyderabad Sur - India	20	-	35	71,00	35	20,00
Promedio mundial suelo (mín.)	10	0,06	6	17,00	7	4
Promedio mundial suelo (máx.)	84	1,10	80	125	221	55

Fuente: Saa et ál. (2011, p. 112).

Parámetros de análisis en agua

En la metodología de Pinilla, Duarte y Vega (2010), se encuentra que algunos de los indicadores de calidad del agua que se han utilizado son factores como la concentración de nutrientes (el estado trófico), la carga de materia orgánica (el estado sapróbico) y la saturación del oxígeno, entre otras. Al seguir esta propuesta se identifica que las variables físico-químicas más relevantes son el pH, la conductividad, los nitratos, el P total, el oxígeno disuelto y la clorofila A.

Por otra parte, el reporte de indicadores ambientales de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) de Bogotá en 2008 indica que los parámetros físico-químicos analizados en aguas fueron As, amonio, Ba, Cd, cianuros, Cu, coliformes totales, Cr hexavalente, Cr total, demanda bioquímica de O, demanda química de O, fenoles totales, P total, grasas y aceites, Mn, Hg, Ni, N, O disuelto, Pb, sólidos suspendidos totales, sulfuros totales, Zn, pH, sólidos sedimentables y temperatura.

Con respecto a este documento, se debe resaltar que los puntos de muestreo tienen alcance a los ríos Torca, Salitre, Fucha, Tunjuelo y cuenca media del río Bogotá. Por lo anterior, las estaciones de monitoreo están relativamente alejadas de los humedales objeto de estudio (Capellanía y La Conejera); los puntos de muestreo más cercanos al humedal Capellanía son los ubicados en la parte occidental del río Fucha, además de que estas son aguas corrientes, es decir, la comparación no sería válida pues los fenómenos biológicos y químicos se dan en condiciones muy diferentes. De aquí la necesidad de conocer los estados actuales de los humedales que hacen parte del presente estudio.

En adición, Sánchez, Herzig, Petters, Márquez y Zambrano (2007) mencionan que los parámetros principales en el monitoreo de estado de los humedales son la temperatura, el pH, el O disuelto, la demanda bioquímica de O y la demanda química de O. Igualmente, Castro (2009) encuentra que los fosfatos, los nitritos, la dureza, los sólidos disueltos totales, la DBO y el pH son las variables que permiten hacer una mayor diferenciación entre los humedales. Aunque en este estudio también se tuvieron en cuenta variables como la temperatura, la conductividad, el O disuelto, los cloruros, los nitratos y el amonio.

Se busca medir en primer lugar la temperatura que, de acuerdo con Chapman y Kimstach (1992), afecta directamente muchos procesos biológicos y físico-químicos incluyendo nutrientes presentes en el agua, especialmente la solubilidad del O disuelto que presenta una relación inversa con la temperatura. Los demás parámetros importantes se mencionan y describen a continuación:

- El O disuelto: parámetro de vital importancia al ser empleado en la respiración de los organismos productores, consumidores y descomponedores, como plantas acuáticas y las algas.
- La DBO: indica de manera indirecta la concentración de MO y materia inorgánica degradable transformable biológicamente mediante procesos biológicos aerobios que se dan principalmente por bacterias y protozoarios.
- La turbidez y transparencia: medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión (arcillas, limos, partículas de sílice) y de MO, que suele ser peligrosa para ciertos organismos.
- La alcalinidad: medida de la capacidad que presenta el agua como neutralizadora de ácidos. Esta característica depende de la concentración de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, los cuáles remueven los iones de hidronio (H_3O^+), disminuyendo así la acidez del agua y por consiguiente aumentando el pH.
- Los nitratos: elementos abundantes e importantes para el crecimiento de algas y plantas acuáticas, que junto con el N orgánico, se encuentran en proteínas y son continuamente reciclados por animales y plantas.
- Los fosfatos: a pesar de que en su forma elemental son tóxicos, son uno de los elementos clave necesarios para el crecimiento de plantas y animales. El P en forma de fosfato estimula el crecimiento del plancton y de plantas acuáticas que proveen alimento a los peces.
- La clorofila A: pigmento que se usa para medir la potencialidad productiva del sistema y como un indicativo de la eutrofización (Contreras, 1994).

- Las grasas y aceites: compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal, vegetal o hidrocarburos provenientes del petróleo, que al ser inmiscibles en el agua van a permanecer en la superficie dando lugar a la aparición de natas y espumas que impiden cualquier tipo de tratamiento físico o químico.

Índice de calidad del agua

Una manera de estimar la calidad del agua según Aguilo et ál. (2004) consiste en la definición de índices globales, los cuales dependen de ciertos parámetros físicos, químicos o biológicos previamente definidos, desde lo que se considera admisible o deseable. Por otra parte, también se podría partir de una base comparativa entre los límites establecidos para cada parámetro, dependiendo del uso que se le vaya a dar a este recurso. En este sentido, como una herramienta para evaluar la calidad del agua se puede calcular el índice de calidad del agua (ICA), que junto con los índices de contaminación (ICO), reduce la cantidad de parámetros monitoreados a una expresión simple. Sin embargo, poseen la desventaja de que se basan en generalizaciones conceptuales que no son de aplicación universal (Torres et ál., 2008).

El procedimiento para definir uno u otro índice sigue de manera general los siguientes pasos (Ramírez & Viña, 1998; Terrado et ál., 2010):

- Selección de variables físicas y químicas
- Transformación de los parámetros requeridos, por lo general de las diferentes unidades y dimensiones en una escala común
- Asignación de valores de calidad (0 a 1) a diferentes concentraciones de las variables o establecimiento de una relación (ecuación) entre índice y variable
- Asignación de coeficientes de ponderación para cada variable
- Cálculo de la puntuación del índice, que se obtiene según los respectivos subíndices en una función común

Una amplia gama de índices de calidad del agua se puede encontrar en la literatura, clasificados según el tipo de variables que consideran, por tanto, se hace distinción entre los ICA fisicoquímicos, biológicos e hidromorfológicos (Terrado, Barceló, Tauler, Borrell & de Campos, 2010). De esta manera se han efectuado diferentes estudios orientados a desarrollar o adaptar los ICA acordes con las características ambientales de algunas fuentes superficiales como lo indican Torres et ál. (2008); en la tabla 6 se muestran las ecuaciones de cálculo de algunos de los ICA.

Tabla 6. Ecuaciones de cálculo empleadas para la determinación de ICA¹¹

Grupo	Índice	Ecuación	Observación
1	ICA NSF/ Dinius (EU) IQA CETESB (Brasil) ICA Rojas (Colombia) ICAUCA (Colombia)	$ICA_m = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i}$	Promedio geométrico ponderado: Wi: peso o porcentaje asignado al i-ésimo, parámetro li: subíndice de i-ésimo
2	CCME WQI (Canadá) DWQI (EU)	$ICA = 100 - \left[\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right]$	El índice incorpora tres elementos: Alcance (F1): % parámetros Frecuencia (F2): porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro exceden la norma Amplitud (F3): magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple
3	uwQI (Europa)	$UWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i$	Promedio aritmético ponderado: Wi: peso o porcentaje asignado al i-ésimo, Parámetro, li: subíndice de i-ésimo parámetro
4	ISQA (España)	$ISQA = T (DQO + SS + OD + Cond)$	T: Temperatura DQO: Demanda química de oxígeno, OD: oxígeno disuelto, Cond: Conductividad, SS: Sólidos suspendidos A partir de 2003 el ISQA se empezó a calcular reemplazando la DQO por el carbono orgánico total (COT en mg/L)
5	IAP (Brasil)	$IAP = ISTO \times IQA$ ISTO = ST x SO ST = Mín - 1 (q1, q2, ..., qn) x Mín - 2 (q1, q2, ..., qn) SO = Media Aritmética (qa, qb, ..., qn)	IQA: índice de calidad del agua adaptado del ICA NSF para las condiciones de Brasil ISTO: Índice de sustancias tóxicas y organolépticas ST: Ponderación de los dos subíndices mínimos más críticos del grupo de sustancias tóxicas SO: Ponderación obtenida a través de la media aritmética de los subíndices del grupo de sustancias organolépticas

Fuente: Torres et ál. (2008, p.7).

Finalmente, un índice adecuado debe ser lo más objetivo posible, tener una buena capacidad de síntesis, incluir las variables que se controlan normalmente y de forma continua, y tener un claro efecto sobre la calidad del agua (p.e. que puedan afectar a la vida acuática, baño, abastecimiento público, riego y usos recreativos); debe ser fácil de usar, flexible y lo suficientemente sensible a pequeños cambios en la calidad del agua (Terrado et ál., 2010).

11 Para mayores aclaraciones sobre el cálculo de estos índices ver Anexo 1 de este capítulo.

Como se observa en la tabla 6, existen diversos índices para determinar la calidad del agua, de modo particular para Colombia se han desarrollado los siguientes índices de contaminación según Fernández, Ramos y Solano (2005).

Tabla 7. Índice de contaminación por mineralización (ICOMI)

$ICOMI = 1/3 (I_{Dureza} + I_{Alcalinidad})$
$I_{Conductividad} = \log_{10} I_{Conductividad} = 3,26 + 1,34 \log_{10} \text{ Conductividad } \mu\text{S/cm}$
$I_{Conductividad} = 10^{\log_{10} I_{Conductividad}}$
Nota: Conductividades mayores a 270 $\mu\text{S/cm}$, tienen un índice de conductividad = 1
$I_{Dureza} = \log_{10} I_{Dureza} = 9,09 + 4,40 \log_{10} \text{ Dureza mg/L}$
$I_{Dureza} = 10^{\log_{10} I_{Dureza}}$
Nota: Durezas mayores a 110 mg/L tienen un índice = 1 y menores a 30 mg/L índice = 0
$I_{Alcalinidad} = 0,25 + 0,005 \text{Alcalinidad mg/L}$
Nota: Alcalinidades mayores a 250 mg/L tienen un índice de 1 y menores a 50 mg/L de 0

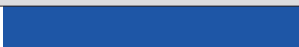



Tabla 8. Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO)

$ICOMO = 1/3 (I_{DBO} + I_{Coliformes} + I_{\% \text{ Oxígeno}})$
$I_{DBO} = 0,05 + 0,070 \log_{10} \text{ DBO mg/L}$
$I_{DBO} = 0,05 + 0,070 \log_{10} \text{ DBO mg/L}$
Nota: DBO > 30 (mg/L) = 1, DBO < 2 (mg/L) = 0
$I_{Coliformes \text{ totales}} = 1,44 + 0,56 \log_{10} \text{ Coliformes Totales (NMP/100 mL)}$
Coliformes Tot > 20.000 (NMP/100 mL) = 1 Coliformes Totales < 500 (NMP/100 mL) = 0
$I_{\% \text{ Oxígeno}} = 1 - 0,01 * \% \text{ Oxígeno}$
Oxígenos (%) mayores a 100% tienen un índice de oxígeno de 0
Para sistemas lénticos con eutrofización y porcentajes de saturación mayores al 100%, se sugiere reemplazar la expresión por:
$I_{\% \text{ Oxígeno}} = 0,01 * \% \text{ Oxígeno} - 1$

Tabla 9. Índices de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS), por trofia (ICOTRO) y por pH (ICOPH)

$ICOSUS = 0,02 + 0,0003 \text{ Sólidos Suspendidos mg/L}$
Sólidos Suspendidos > a 340 mg/L tienen un ICOSUS = 1 < a 10 mg/L ICOSUS = 0
Se calcula sobre la base de la concentración de Fósforo Total en mg/L
Oligotrofia: < 0.01, Mesotrofia: 0.01-0.02, Eutrofia: 0.02-1.00, Hipereutrofia: >1.00
$ICOPH = \frac{e^{-31,08+3,45\text{pH}}}{1 + e^{-31,08+3,45\text{pH}}}$

Tabla 10. Escala del ICO según el grado de contaminación

ico	Grado de Contaminación	Escala de color
0-0,2	Ninguna	
> 0,2-0,4	Baja	
> 0,4-0,6	Media	
> 0,6-0,8	Alta	
> 0,8-1	Muy Alta	

Fuente: Elaboración propia con base en (Fernández et al., 2005)

Parámetros para el análisis de la calidad del aire

En primera instancia es pertinente describir el material particulado, debido a que este hace parte de la contaminación del aire. Las partículas suspendidas totales (PST) albergan un amplio espectro de material particulado, con diámetro aerodinámico menor a 30 μm . Las PST están conformadas tanto por contaminantes primarios (polvo y hollín) como secundarios (partículas producidas por la condensación de vapores). Ahora bien, en las últimas décadas el control del material particulado ha sido cada vez más restrictivo empezando por un diámetro aerodinámico menor a 10 μm . (PM_{10}), que incluye en la actual normatividad para material particulado menor a 2.5 μm . ($\text{PM}_{2,5}$), debido principalmente a que no hay un límite de no afectación para los contaminantes más estudiados — PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, NO_2 , SO_2 y O_3 — (OPS, 2012).

La composición química de las partículas depende de la fuente de emisión y varía con el tamaño de las mismas. Sin embargo, generalmente entre tamaños menores a $\text{PM}_{2,5}$ y de $\text{PM}_{2,5}$ a PM_{10} se encuentran contaminantes como sulfatos, hidrocarburos, aromáticos policíclicos, Pb, As, Be, Cd, amonio, Hg, nitratos, sílice, compuestos de Fe y Al, entre otros. El transporte de metales pesados o elementos nocivos en las partículas finas tiene grandes consecuencias en la salud a largo plazo (Hussein, 2004).

Otro de los principales contaminantes atmosféricos presentes en las zonas altamente industrializadas y en las ciudades con un número elevado de automóviles es el ozono (O_3). Más de la mitad de los ingredientes necesarios para producirlo provienen de los gases de escape de automóviles. Asimismo, el monóxido de carbono (CO), producto de la combustión incompleta de los hidrocarburos, aunque no se pueda ver ni oler, puede causar la muerte por inhalación cuando la concentración es elevada y el tiempo de exposición es prolongado; esto impide el transporte del oxígeno pulmonar a los tejidos y las células del organismo (EPA, 2012).

Adicionalmente, es importante tener en cuenta como parámetros dos tipos de óxidos. Los óxidos de N (N_xO_y), constituidos por la combinación entre N y O, que dependiendo de las condiciones pueden estar en estado líquido o gaseoso, por ejemplo, el dióxido de nitrógeno, con un fuerte olor desagradable es líquido a temperatura ambiente ($<20^\circ\text{C}$), pero a temperaturas superiores se convierte en gas, este y el monóxido de nitrógeno hacen parte de los óxidos de nitrógeno más tóxicos (ATSDR, 2012).

Por otra parte, los óxidos de azufre (SO_x) son producidos por los gases de los tubos de escape de los automóviles, las refinerías de petróleo, los procesos de fabricación del papel y las industrias químicas con impactos en el sistema respiratorio, asociados también principalmente a actividades relacionadas con la combustión de carbón o aceite en plantas eléctricas o en fundidoras de *Cu*. El dióxido de azufre (SO_2) es el contaminante atmosférico que causa mayor preocupación, pues se trata de un gas incoloro irritante, con sabor amargo, que se disuelve en el agua para formar el ácido sulfuroso y afecta los ojos y la piel, así como las vías respiratorias superiores y penetra los pulmones durante la respiración por la boca, a diferencia de cuando se respira por la nariz.

Para el análisis del recurso aire se tomó información secundaria de las concentraciones de los contaminantes considerados en el presente estudio. Dichos datos fueron obtenidos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAAB), a través de la SDA.

Índice de calidad del aire

Los índices de contaminación del aire se desarrollan para indicar el nivel de gravedad de la contaminación de este para la población. En 1976, la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) estableció un índice estándar de contaminantes —PSI— (EPA, 1998). Fundamentados en esta filosofía, índices similares son ampliamente usados en todo el mundo (Kyrkilis et ál., 2007). Actualmente, el PSI se conoce como AQI —índice de calidad del aire— (Cheng et ál., 2007). Se utilizan dos enfoques para desarrollar un índice AQI: un modelo de valor máximo y uno global (Kyrkilis et ál., 2007).

Modelo de la EPA del valor máximo AQI

El AQI transforma las concentraciones de contaminantes medidos a un número en una escala adimensional de 0 a 500 (Kyrkilis et ál., 2007; EPA, 1998), donde 100 es igual a los Estándares Nacionales de Calidad de Aire Ambiental (NAAQS) en EE.UU. El AQI se calcula para cada contaminante con los NAAQS. Se utilizan descriptores tales como “bueno” o “poco saludable” para transmitir implicaciones para la salud de este nivel. De este modo, el AQI diario está de-

terminado por el valor más alto de uno de los cinco contaminantes principales del aire: material particulado (PM_{10}), O_3 , SO_2 , CO y NO_2 (Cheng et ál., 2007). De esta manera, el AQI se calcula utilizando los datos de concentración de los contaminantes —tabla 11— (EPA, 1998):

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

Donde:

I_p = índice para el contaminante p

C_p = la concentración de contaminante redondeado p

BP_{Hi} = el punto de corte que es mayor que o igual a C_p

BP_{Lo} = el punto de corte que es menor que o igual a C_p

I_{Hi} = el valor AQI correspondiente a BP_{Hi}

I_{Lo} = el valor AQI correspondiente a BP_{Lo}

Tabla 11. Puntos de corte para cada categoría de AQI

Contaminante	Bueno	Moderado	No saludable grupo sen	No saludable	Muy poco saludable	Peligroso	Severo
Valor del índice	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300	301-400	401-500
CO 8-hr (m)	0.0-4.4	4.5-9.4	9.5-12.4	12.5-15.4	15.5-30.4	30.5-40.4	40.5-50.4
NO_2 promedio diario (m)	(2)	(2)	(2)	(2)	0.65-1.24	1.25-1.64	1.65-2.04
O_3 1-hr (m) (1)	-	-	0.125-0.164	0.165-0.204	0.205-0.404	0.405-0.504	0.505-0.604
O_3 8-hr (m)	0.00-0.069	0.070-0.084	0.085-0.104	0.105-0.124	0.125-0.374 (0.155-0.404) (4)	(3)	(3)
PM_{10} promedio diario ($\mu g/m^3$)	0-54	55-154	150-254	255-354	355-424	425-504	505-604
SO_2 promedio diario (m)	0.0-0.034	0.035-0.144	0.145-0.224	0.225-0.304	0.305-0.604	0.605-0.804	0.805-1.004

Fuente: EPA (1998).

(1) Las áreas están obligadas a informar al AQI basado en los valores de ozono de 8 horas. Sin embargo, existen áreas en las que un AQI sobre la base de valores de ozono 1 hora sería más adecuado. En estos casos el índice, tanto para la de 8 horas y los valores de ozono de 1 hora se pueden calcular y el AQI máximo debe ser reportado. (2) NO_2 no tiene NAAQS a corto plazo y puede generar un AQI solo por encima de un valor de 200 PSI. (3) Valores de ozono 8 horas no definen valores de AQI más altos (301). Valores de AQI de 301 o superior se calculan con las concentraciones de O_3 1 hora. (4) Los números en paréntesis se asocian valores de 1-hora solo pueden ser utilizados en esta categoría.

Con el fin de entender de modo más sencillo, el AQI se divide en seis categorías dependiendo del nivel de contaminación del aire; cada categoría está agrupada con un color especial y cada una corresponde a un nivel diferente de problemas de salud (tabla 12).

Tabla 12. Escala de colores de AQI y niveles para la salud

Valores índice de calidad Aire (AQI)	Niveles Preocupación por la salud	Colores
0-50	Bueno	Verde
51-100	Moderado	Amarillo
101-150	No saludable para grupos sensibles	Naranja
151 a 200	No saludable	Rojo
201 a 300	Muy poco saludables	Morado
301 a 500	Peligrosos	Granate

Fuente: EPA, 2013

De esta manera, las categorías presentadas en la tabla 11 presentan las siguientes características:

Bueno (AQI 0-50): la calidad del aire se considera satisfactoria y la contaminación del aire representa poco o ningún riesgo.

Moderado (aqi 51-100): la calidad del aire es aceptable; sin embargo, algunos contaminantes pueden generar problemas moderados de salud para un número reducido de personas. Por ejemplo, las personas que son excepcionalmente sensibles al ozono pueden experimentar síntomas respiratorios.

No saludable para grupos sensibles (aqi 101-150): aunque la mayoría de la población no es probable que se vea afectada en este rango AQI, las personas con enfermedades pulmonares, los adultos mayores y los niños están en un mayor riesgo de la exposición al ozono, así mismo las personas con enfermedades cardíacas y pulmonares, los adultos mayores y los niños están en mayor riesgo por la presencia de partículas en el aire.

No saludable (aqi 151-200): todas las personas pueden empezar a experimentar algunos efectos adversos en la salud, mientras los miembros de los grupos sensibles pueden experimentar efectos más graves.

Muy poco saludables (aqi 201-300): daría lugar a una alerta de salud que significa que todo el mundo puede experimentar efectos de salud más graves.

Peligrosos (aqi mayor que 300): daría lugar a advertencias de condiciones de emergencia, toda la población tiene más probabilidades de ser afectada.

Modificación de la escala de AQI de acuerdo con las normas europeas

Adicionalmente, las normas europeas han modificado en cierto modo la escala del AQI¹². La tabla 13 muestra el nuevo intervalo de concentración de contaminantes para cada categoría de calidad del aire (Kyrkilis et ál., 2007).

Tabla 13. Escala modificada para el cálculo de AQI de acuerdo con los estándares europeos

Categoría	AQI	CO	NO ₂	O ₃	O ₃	PM ₁₀	SO ₂
Bueno	0–50	0–4.7	0–152	0–137	0–91	0–18	0–30
Moderado	51–100	4.7–10	152–200	137–180	91–120	18–75	30–125
No salud. G. sensi	101–150	10–13	200–262	180–236	120–149	75–124	125–194
No saludable	151–200	13–16	262–326	236–294	159–177	124–172	194–264
Muy poco salud	201–300	16–32	326–646	294–582	177–534	172–206	264–524
Peligroso	301–400	32–43	646–806	582–726	534–667	206–245	524–698
Severo	401–500	43–54	806–966	726–870	667–799	245–294	698–872
		8hrmg/m ³	Día µg/m ³	Día µg/m ³	8-hr(µg/m ³)	Día µg/m ³	Día (µg/m ³)

Fuente: Kyrkilis et al. (2007).

Modelo global

De acuerdo con casi todos los modelos que reflejan el efecto de diversos contaminantes del aire, la concentración de cada uno de ellos se convierte en un subíndice, que se expresan como funciones de la relación de concentración q de contaminantes a una concentración estándar q_s , de modo que: $AQI = AQI_s (q/q_s)$; donde AQI es el subíndice del respectivo contaminante y AQI_s , el coeficiente de escala igual a 500. De tal manera, los diferentes contaminantes se pueden combinar en un índice global de calidad del aire. El índice de calidad del aire uniforme es importante si queremos comparar la calidad del aire en el espacio y el tiempo y predecir los efectos sobre la salud (Kyrkilis et ál., 2007).

12 Las concentraciones se presentan en g/m³ (excepto de CO que es en mg/m³).

$$I = \left(\sum_i^n (AQI_i)^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

Donde I = índice general de calidad del aire; AQI_i es el AQI para un contaminante i y $p =$ constante.

Cuando p es igual a 1, el índice general I es igual a la suma de todos los índices AQI. Este tipo de cálculo sobreestima los niveles de contaminación del aire, ya que supone que todos los efectos de los diferentes contaminantes se pueden añadir de una manera lineal. Incluso, diferentes estudios han propuesto valores de p entre 2 y 3. Cuando p es igual a 2.5, un caso intermedio entre los dos extremos los resultados han sido satisfactorios (Kyrkilis et ál., 2007). Finalmente, de las herramientas disponibles para el cálculo del AQI se encuentra la AQI Calculator, disponible en línea en la página web de la EPA, esta herramienta se considera adecuada para los efectos del presente estudio.

Referencias

- Aguilo, M., Aramburu, M. P., Blanco, A., et ál. (2000). Paisaje. En *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. (pp. 481-544). España, Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente.
- Barbier, E., Acreman, M., & Knowler D. (1997). *Valoración económica de los humedales. Guía para decisores y planificadores*. Oficina de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*, 147(3-4), 159–171. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Castro D. (2009). *Desarrollo de un índice de diatomeas perifíticas para evaluar el estado de los humedales de Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Chapman, D. (1992). *Water quality assessments*. Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/watqualassess.pdf
- Chaves, M. (2012). Relaciones catiónicas y su importancia para la agricultura. *Ventana Lechera*, 18, 10–20. Recuperado de <http://www.laica.co.cr/biblioteca/servlet/DownloadServlet?c=443&s=1762&d=8130>
- Cheng, C., Zhang, L., & Pai, C. (2007). Comparison of the revised air quality index with the PSI and AQI indices. *Science of the Total Environment*, 382, 191–198.
- Cuesta, P., & Villaneda, E. (s.f.). *Análisis de suelos: Toma de muestras y recomendaciones de fertilización para la producción ganadera*. Recuperado de <http://www.corpoica.org.co/sitioweb/archivos/foros/capitulouno.pdf>
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Alied Soil Ecology*, 15(1), 3–11. Doi:10.1016/S0929-1393(00)00067-6
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá & Conservación Internacional Colombia (2009). Componente físico. En *Plan de manejo ambiental humedal capellanía*. Recuperado

- de <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/1bfo2b8f-aae3-48d2-861b-ce7c99d93b01>
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá & Conservación Internacional Colombia (2009). Componente ecológico en limnología. En *Plan de manejo ambiental humedal capellanía*. Recuperado de <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/287e4a5f-5f4d-42ab-9833-fcd281b55ef9>
- Environmental Protection Agency. (1998). Guideline for reporting of daily air quality – pollutant standards index (PSI). Recuperado de <https://goo.gl/SiGXYC>
- Environmental Protection Agency. (2012). *Carbon monoxide (CO) pollution in outdoor air*. Recuperado de <http://www.epa.gov/airquality/carbonmonoxide/>
- Environmental Protection Agency. (2013). *Air quality planning and standards*. Recuperado de <http://www.epa.gov/airquality>.
- Fernández, N., Ramos, G., & Solano, F. (2005). *Una herramienta para la valoración de la calidad del agua*. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Herrick, J. E. (2000). Soil quality: an indicator of sustainable land management? *Allied Soil Ecology*, 15(1), 75-83. Doi:10.1016/S0929-1393(00)00073-1
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114(3-4), 145–156. doi:10.1016/S0016-7061(03)00039-9
- Kyrkilis, G., Chaloulakou, A., & Kassomenos P. (2007). Development of an aggregate Air Quality Index for an urban Mediterranean agglomeration: relation to potential health effects. *Environment International*, 33(5): 670-676.
- Moreno, V., García, J. F., & Villalba, J. C. (s.f.). *Descripción general de los humedales de Bogotá, D.C.* Recuperado de: <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/humed.pdf>
- Nebel, B., & Wright, R. (1999). *Ciencias ambientales - ecología y desarrollo sostenible*. México D.F.: Prentice Hall Hispanoamericana.
- Oliva, D. (2009). *Determinación de la acidez intercambiable (Al⁺³+H⁺) a partir del pH para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua*. Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/386/1/T2804.pdf>
- Órtiz, G. (s. f.). *Análisis químico del suelo, toma de muestras, calibración, interpretación y recomendaciones de fertilizantes*. Recuperado de http://digitool.gsl.com.mx:1801/webclient/StreamGate?folder_id=0&dvs=1413464404395~114
- Pinilla, G., Duarte J., & Vega, L. (2010). Índice de estado limnológico (IEL) para evaluar las condiciones ecológicas de las ciénagas del canal del Dique, Colombia. *Acta biológica Colombia*, 15(2), 169-188.
- Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., et ál. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3-4), 325-334. Doi:10.1016/j.geoderma.2008.12.015
- Ramírez, G. A., & Viña, V. G. (1998). *Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis*. Bogotá: BP Exploration Company y Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Roledo, D., Galantini, J., Ferreccio, E., et ál. (2013). Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ciencia del Suelo*, 31(M), 201-212. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672013000200006&script=sci_arttext
- Saa, G., Rodríguez, J., & Madriñán, R. (2011). Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: perspectivas para Colombia. *Acta Agronómica*, 60(3): 203-218. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/1699/169922438001.pdf>

- Sánchez, O., Herzig, M., Petters, E., Márquez, R., & Zambrano, L. (Eds). (2007). Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. México D. F.: Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat)
- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2010). Manual 13. Inventario, evaluación y monitoreo. Recuperado de <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/hbk4-13sp.pdf>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2008). Reporte indicador ambientales. Acuerdo 67 de 2002. Bogotá D. C. Alcaldía Mayor.
- Secretaría Distrital de Ambiente (2009). Informe Anual. Calidad del Aire de Bogotá- Año 2008 - Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB.
- Secretaría Distrital de Ambiente (2011). Informe Anual. Calidad del Aire de Bogotá- Año 2010 - Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB.
- Secretaría Distrital de Ambiente (2012). Informe Anual. Calidad del Aire de Bogotá- Año 2011 - Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB.
- Secretaría Distrital de Salud de Bogotá y Hospital Fontibón E.S.E. (2013). Boletín Epidemiológico Informativo. Calidad del aire y Salud – “Fontibón Respira”. Área de Atención al Medio Ambiente. Grupo Técnico calidad de aire y salud.
- Stocking, M., & Murnaghan, N. (2003). *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra*. Madrid: Mundi-Prensa Libros.
- Terrado, M., Barceló, D., Tauler, R., Borrell, E., & de Campos, S. (2010). Surface-water-quality indices for the analysis of data generated by automated sampling networks. *Trends in Analytical Chemistry*, 29(1): 40-52.
- Tosse, O. (2003). *Legislación ambiental relacionada con contaminación del recurso suelo en Colombia*. Recuperado de <http://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/legislacion-ambiental-relacionada-con-contaminacion-del-recurso-suelo-en-colombia>
- Yoldi, L. (2004). Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio Ambiente.
- ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Recuperado de http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html

Anexo 1. Parámetros de clasificación de la calidad de los diferentes índices fisicoquímicos de la calidad del agua

Índice	Parámetros	Rango Aplicable	Función subíndice
ISQA o (Calidad mínima) – 100 (máxima calidad) $ISQA = I_T * (I_{TOC} + I_{SS} + I_{DO} + I_{COND})$	Temperatura (°C)	≤ 20	$I_T = 1$
		> 20	$I_T = 1 - (T - 20) * 0.0125$
	Carbono orgánico total (mg/L)	≤ 5	$I_{TOC} = 30 - TOC$
		$12 > TOC > 5$	$I_{TOC} = 21 - (0.35 * TOC)$
		> 12	$I_{TOC} = 0$
	Sólidos Suspendidos (mg/L)	≤ 100	$I_{SS} = 25 - (0.15 * SS)$
		$250 > SS > 100$	$I_{SS} = 17 - (0.07 * SS)$
		> 250	$I_{SS} = 0$
	Oxígeno disuelto (mg/L)	≤ 10	$I_{DO} = 2.5 * DO$
		> 10	$I_{DO} = 25$
Conductividad ($\mu S/cm$)	≤ 4000	$I_{COND} = (3.6 - \log COND) * 15.4$	
	> 4000	$I_{COND} = 0$	
Pescy Wunderlin o (Calidad mínima) 100 (máxima calidad) $WQI_{min} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_i$	Oxígeno disuelto (mg/L)	≤ 1	$I_{DO} = 0$
		$2 > DO > 1$	$I_{DO} = 10$
		$3 > DO > 2$	$I_{DO} = 20$
		$3.5 > DO > 3$	$I_{DO} = 30$
		$4 > DO > 3.5$	$I_{DO} = 40$
		$5 > DO > 4$	$I_{DO} = 50$
		$6 > DO > 5$	$I_{DO} = 60$
		$6.5 > DO > 6$	$I_{DO} = 70$
		$7 > DO > 6.5$	$I_{DO} = 80$
		$7.5 > DO > 7$	$I_{DO} = 90$
Conductividad ($\mu S/cm$)	> 7.5	$I_{DO} = 100$	
	> 12000	$I_{COND} = 0$	
	$12000 > COND > 8000$	$I_{COND} = 10$	
	$8000 > COND > 5000$	$I_{COND} = 20$	

Índice	Parámetros	Rango Aplicable	Función subíndice	
		$5000 > \text{COND} \geq 3000$	$I_{\text{COND}} = 30$	
		$3000 > \text{COND} \geq 2500$	$I_{\text{COND}} = 40$	
		$2500 > \text{COND} \geq 2000$	$I_{\text{COND}} = 50$	
		$2000 > \text{COND} \geq 1500$	$I_{\text{COND}} = 60$	
		$1500 > \text{COND} \geq 1250$	$I_{\text{COND}} = 70$	
		$1250 > \text{COND} \geq 1000$	$I_{\text{COND}} = 80$	
		$1000 > \text{COND} \geq 750$	$I_{\text{COND}} = 90$	
		< 750	$I_{\text{COND}} = 100$	
		Turbidez (NTU)	> 100	$I_{\text{TURB}} = 0$
			$100 > \text{TURB} \geq 80$	$I_{\text{TURB}} = 10$
			$80 > \text{TURB} \geq 60$	$I_{\text{TURB}} = 20$
			$60 > \text{TURB} \geq 40$	$I_{\text{TURB}} = 30$
			$40 > \text{TURB} \geq 30$	$I_{\text{TURB}} = 40$
		Oxígeno disuelto (mg/L)	< 6.5	$I_{\text{DO}} = 1$
			$4.6 - 6.5$	$I_{\text{DO}} = 3$
$2 - 4.5$	$I_{\text{DO}} = 6$			
< 2	$I_{\text{DO}} = 10$			
BOD ₅ (mg/L)	< 3	$I_{\text{BOD}} = 1$		
	$3 - 4.9$	$I_{\text{BOD}} = 3$		
	$5 - 15$	$I_{\text{BOD}} = 6$		
	> 15	$I_{\text{BOD}} = 10$		
Sólidos Suspendidos (mg/L)	< 20	$I_{\text{SS}} = 1$		
	$20 - 49$	$I_{\text{SS}} = 3$		
	$50 - 100$	$I_{\text{SS}} = 6$		
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	> 100	$I_{\text{SS}} = 10$		
	< 0.5	$I_{\text{NH}_3\text{-N}} = 1$		
	$0.5 - 0.99$	$I_{\text{NH}_3\text{-N}} = 3$		
	$1 - 3$	$I_{\text{NH}_3\text{-N}} = 6$		
	> 3	$I_{\text{NH}_3\text{-N}} = 10$		

Liou
Escala
 $< 2 \rightarrow$ bueno
 $2 - 3 \rightarrow$ ligeramente contaminada
 $3.1 - 6 \rightarrow$ moderadamente contaminada
 $> 6 \rightarrow$ muy contaminado

$$WQI_{\text{min}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 I_i$$

Índice	Parámetros	Rango Aplicable	Función subíndice
NSFWQI 0-25 → Muy mala 26-50 → mala 51-70 → regular 71-90 → Buena 91-100 → Excelente	Oxígeno Disuelto % saturación)	0.17	
	Coliformes Fecales (1b/100ml)	0.16	
	pH	0.11	
	BOD ₅ (mg/L)	0.11	
	Nitratos (mg/L)	0.10	
	Fosfatos (mg/L)	0.10	
	Temperatura (°C)	0.10	
	Turbidez (NTU)	0.08	
	Sólidos Totales (mg/L)	0.07	
	CCME WQI	25 > TURB >= 20	I _{TURB} = 60
20 > TURB >= 15		I _{TURB} = 70	
15 > TURB >= 10		I _{TURB} = 80	
10 > TURB >= 5		I _{TURB} = 90	
< 5		I _{TURB} = 100	

$$NSFWQI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i I_i}{\sum W_i}$$

Los valores extraídos de la gráfica de calidad elaborados para cada parámetro.

$$CCME WQI = 100 - \left[\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right]$$

Fuente: Terrado et al. (2010).

Este libro se editó e imprimió
en Bogotá en noviembre de 2018 y
está compuesto por la fuente Meta Pro