



El ambiente
es de todos

Minambiente

2021

BANCO DE INDICADORES PARA EL PROCESO DE LICENCIAMIENTO AMBIENTAL

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	10
Aclaraciones frente a la aplicabilidad del banco de indicadores para el proceso de licenciamiento ambiental	12
Enfoque Metodológico	14
Análisis de los requerimientos de información de los TdR	21
Referentes conceptuales	26
Indicadores ambientales	27
<i>Medio Abiótico</i>	27
Componente geológico	27
1. Designación de la calidad de la roca (RQD)	27
2. Clasificación de la masa de la roca – Clasificación de Bieniawski (RMR)	28
3. Potencial de generación de ácido en minas	32
4. Potencial de lixiviación	32
Componente geomorfológico	33
5. Índice de sinuosidad del frente de la montaña	34
6. Índice de asimetría de la cuenca de drenaje	35
7. Variaciones del perfil de playa: erosión y acreción costera	36
Componente edáfico	37
8. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	37
9. Porcentaje de saturación de bases	38
10. Proporción del área de suelos degradados por salinización (PASDS)	39
11. Proporción del área de suelos degradados por erosión (PASDE)	40
12. Área de remoción de suelo	41
Componente geotecnia	42
13. Factor de seguridad	42
14. Capacidad Portante	43
15. Factor de estabilidad	45
16. Potencial de colapso (PC)	45
17. Consistencia y plasticidad del suelo	46
Componente hidrológico	48
18. Índice del uso del agua	48
19. Índice de retención y regulación hídrica (IRH)	49
20. Índice de vulnerabilidad hídrica (IVH)	50
21. Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL)	51
22. Índice de calidad del agua (ICA)	53
23. Sólidos suspendidos totales (SST)	55
24. Sólidos sedimentables (SD)	56
25. Sólidos totales (ST)	56
26. Turbiedad	57
27. Índice de Langelier	57
28. Concentración de grasas y aceites	58
29. Carga contaminante en el agua	59
30. Potencial de eutrofización	60
31. Tasa de cambio en la concentración de bifenilos policlorados (PCB)	60
32. Huella hídrica gris (HHg)	61

33.	Huella Hídrica Azul (HHa)	62
34.	Índice de eficiencia en el uso del agua	62
35.	Índice de uso de agua para la disolución de sustancias contaminadas	63
36.	Índice de amenaza asociada a la disponibilidad hídrica	63
37.	Índice de compacidad	64
38.	Factor de forma	65
39.	Densidad de drenaje	66
40.	Índice de sinuosidad	67
Componente hidrogeológico		68
41.	Índice de vulnerabilidad intrínseca (GOD)	68
42.	Índice de escasez para agua subterránea	69
43.	Índice de extracción de agua subterránea (IEAS)	70
44.	Sobreexplotación del acuífero	71
45.	Salinidad	72
46.	Índice de calidad de aguas subterráneas (ICA-AS)	73
Componente oceanográfico		74
47.	Cambio de la temperatura superficial del mar	74
48.	Acidificación del océano	75
49.	Acreción	76
Componente atmosférico		77
50.	Inventario de emisiones atmosféricas (IEA)	77
51.	Índice de precipitación	78
52.	Anomalía de temperatura media	79
53.	Potencial de calentamiento global (GWP)	80
54.	Potencial de acidificación	82
55.	Potencial de agotamiento de ozono	83
56.	Índice de calidad del aire (ICA)	84
57.	Concentración de bifenilos policlorados (PCB)	86
58.	Concentración de compuestos orgánicos volátiles (COV)	86
59.	Concentración de metales pesados	88
60.	Concentración de elementos radiactivos de origen natural	89
61.	Radiación no ionizante	91
62.	Radiación ionizante	93
63.	Número de personas potencialmente afectadas por la contaminación atmosférica	94
64.	Niveles de olores ofensivos	95
65.	Niveles de presión sonora	98
66.	Densidad del número de fuentes de ruido presentes en el área	99
67.	Número de personas afectadas por ruido	100
68.	Indicador de vibraciones	100
<i>Medio Biótico</i>		102
Componente ecosistemas terrestres		102
69.	Área basal de cada especie (AB)	102
70.	Densidad absoluta (DA)	103
71.	Densidad relativa (DR)	103
72.	Abundancia relativa (AR)	104
73.	Diámetro promedio cuadrático (DQ)	104
74.	Frecuencia Absoluta (FA)	105
75.	Frecuencia relativa (FR)	106
76.	Índice de Valor de Importancia (IVI)	106
77.	Índice de Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta (AHPPN)	107
78.	Índice de fragmentación	108
79.	Índice de contexto paisajístico (fragmentación)	109

80.	Índice de dimensión fractal	109
81.	Índice de forma (fragmentación)	110
82.	Índice de vegetación natural remanente (IVR)	111
Componente ecosistemas acuáticos		112
83.	Índice de Calidad Ecológica (ICE)	112
84.	Índice Promedio Ponderado Hidrobiológico (IPPH)	113
85.	Índice Biológico BMWP/Col (Biological Monitoring Working Party Score)	114
86.	Índice Biótico Andino (IBA)	116
87.	Índice de tolerancia mínima de macroinvertebrados Sabana de Bogotá	119
88.	Índice de Calidad Ecológica con Base en Macroinvertebrados Acuáticos para la Cuenca del Río Negro (ICE _{RM-MAE})	122
89.	Índice de Estado Limnológico (IEL)	124
90.	Índice de Integridad Biótica de los macroinvertebrados- IIBM (para ecosistemas acuáticos)	128
91.	Índice de Condiciones Limnológicas (ICOL)	130
Componente coberturas de la tierra		132
92.	Cambio en la superficie cubierta por bosque natural (CSBN)	132
93.	Tasa anual de cambio de superficie cubierta por diferentes coberturas (TCDC)	133
94.	Proporción de la Superficie Cubierta por Bosque Natural (PSNB)	134
95.	Variación de la superficie de los ecosistemas naturales continentales (VSENC)	135
96.	Proporción de la superficie cubierta por diferentes coberturas	137
Componente flora y fauna		138
97.	Riqueza de especies por subgrupo	138
98.	Número de especies endémicas	139
99.	Número de especies migratorias	139
100.	Número de especies en alguna categoría de amenaza	140
101.	Porcentaje de infestación de especies invasoras	142
102.	Índice de Margalef	143
103.	Índice de Simpson (λ)	144
104.	Serie de números de Hill	145
105.	Índice de Shannon-Wiener (H')	146
106.	Índice de Pielou	147
107.	Índice de Brillouin	148
108.	Equidad de Brillouin	148
109.	Índice de Jaccard	149
110.	Índice de Sorencen o de Czekanowski (coeficiente de similitud-cualitativo)	150
111.	Índice de Sorensen (coeficiente de similitud-cuantitativo)	151
112.	Índice de Sokal y Sneath	152
113.	Índice de Morisita-Horn	152
114.	Índice de Whittaker	153
115.	Índice de Shannon	154
116.	Índice de Bray y Curtis	155
117.	Índice de Cody	155
118.	Índice de Magurran	156
119.	Índice de complementariedad	157
120.	Índice Gamma (γ)	158
<i>Medio Socioeconómico</i>		158
Componente demográfico		158
121.	Variación poblacional	158
122.	Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	159
123.	Tasa de mortalidad infantil	160
124.	Índice de nivel de conflicto ambiental	161
Componente espacial		162

125.	Cobertura de servicios sociales	162
126.	Cobertura de servicios de salud	163
127.	Índice de cobertura de servicios públicos domiciliarios	164
128.	Índice de seguridad vial	165
129.	Índice de tiempos de movilidad	166
130.	Índice generación de residuos	166
131.	Índice de intensidad de uso de materiales	168
132.	Índice intensidad de uso de la energía	170
Componente económico		171
133.	Índice de precios al consumidor (IPC)	171
134.	Tasa de desempleo (TD)	172
135.	Tasa global de participación (TGP)	173
136.	Tasa de ocupación de la población económicamente activa	174
137.	Índice de valorización predial (IVP)	174
138.	Índice Gini de la Tierra Rural (GTR)	176
139.	Índice de pobreza multidimensional	177
140.	Cambio en el PIB municipal	179
141.	Aporte al PIB municipal	180
142.	Captura por unidad de esfuerzo (especies y métodos de captura)	181
Componente cultural		181
143.	Asistencia escolar	181
144.	Tasa de cobertura escolar bruta	182
145.	Densidad de infraestructura cultural	183
146.	Índice de calidad del paisaje	183
Componente político administrativo		187
147.	Índice de Vulnerabilidad territorial (IVT)	187
<i>Indicadores asociados a plaguicidas</i>		190
148.	Constante de Ley de Henry (H)	190
149.	Coefficiente de Adsorción de Carbono Orgánico (K_{oc})	192
150.	Coefficiente de Partición Octanol / Agua (K_{ow})	193
151.	Cociente de riesgo ambiental agudo (RQ_{agudo})	194
152.	Ecotoxicidad	195
153.	Persistencia	197
154.	Potencial de contaminación de agua subterránea	198
Bibliografía		200

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. TdR revisados para la identificación de los requerimientos de información	14
Tabla 2. Modelo de clasificación del ambiente de Arboleda	17
Tabla 3. Modelo de clasificación del ambiente de Conesa	18
Tabla 4. Requerimientos de información por TdR	24
Tabla 5. Interpretación de la designación de la calidad de la roca	27
Tabla 6. Interpretación del parámetro de resistencia de la roca intacta	29
Tabla 7. Interpretación del parámetro de designación de la calidad de la roca (RQD)	29
Tabla 8. Interpretación del parámetro de espacio de las juntas o discontinuidades	29
Tabla 9. Interpretación del parámetro de condición de juntas	30
Tabla 10. Interpretación del parámetro de condición del agua subterránea	30
Tabla 11. Evaluación del efecto de orientación de las juntas en túneles	30
Tabla 12. Evaluación del efecto de orientación conjunta sobre la estabilidad de la fundación de una presa (aplica a cimentaciones)	30
Tabla 13. Corrección por la orientación de las discontinuidades	31
Tabla 14. Interpretación del índice RMR en relación con la calidad de macizos rocosos	31
Tabla 15. Interpretación de AF, RF y AFT en relación con el potencial de lixiviación	33
Tabla 16. Interpretación y categorización del Índice de sinuosidad frente de la montaña	34
Tabla 17. Interpretación del factor de asimetría de la cuenca	35
Tabla 18. Niveles de CIC para diferentes coloides	37
Tabla 19. Interpretación de los niveles de intercambio catiónico	38
Tabla 20. Interpretación de la saturación por bases	38
Tabla 21. Interpretación del índice de proporción del área de suelos degradados por salinización	40
Tabla 22. Grados de erosión	41
Tabla 23. Factores de seguridad recomendables para taludes nuevos, considerando un periodo de lluvia de diez años.	43
Tabla 24. Factores de seguridad recomendables para taludes existentes, para el diseño de obras remediales y preventivas, considerando un periodo de lluvias de 10 años.	43
Tabla 25. Interpretación del potencial de colapso (PC)	46
Tabla 26. Tipo de suelo por rangos de valores del índice de plasticidad	47
Tabla 27. Consistencia del suelo	48
Tabla 28. Interpretación y categorización del IUA	49
Tabla 29. Interpretación del índice de Regulación Hídrica (IRH)	50
Tabla 30. Matriz de calificación del Índice de Vulnerabilidad Hídrica – IVH con base en la relación del IUA y el IRH	51
Tabla 31. Rangos IACAL para las variables tipo i	52
Tabla 32. Rangos IACAL de clasificación de la vulnerabilidad de la subzona hidrográfica	53
Tabla 33. Valores de referencia para las variables de análisis del Índice de Calidad del Agua (ICA)	54
Tabla 34. Calificación de la calidad del agua según el valor de ICA	55
Tabla 35. Interpretación del Índice de Langelier	58
Tabla 36. Interpretación del índice de compacidad de la cuenca	65
Tabla 37. Interpretación de factor de forma de la cuenca	65
Tabla 38. Categorías de sinuosidad	67
Tabla 39. Grado de confinamiento hidráulico	68
Tabla 40. Consolidación y características litológicas	68
Tabla 41. Profundidad	69

Tabla 42. Valores de Y y P para cada parámetro.....	73
Tabla 43. Interpretación del ICA-AS	74
Tabla 44. Valores de pH y relación con la concentración de iones de hidrógeno.....	75
Tabla 45. Clasificación de contaminantes atmosféricos	77
Tabla 46. Factores de potencial de calentamiento global relativos al CO ₂ para diferentes GEI	80
Tabla 47. Tipos de radiación en diferentes longitudes de onda.....	83
Tabla 48. Interpretación del ICA	84
Tabla 49. Puntos de corte para el cálculo del ICA.....	85
Tabla 50. Límites de exposición a los PCBs.....	86
Tabla 51. Coeficientes de captación para BTEX	88
Tabla 52. Niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire (COV)	88
Tabla 53. Niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire (Metales pesados)	89
Tabla 54. Rangos de frecuencias de radiaciones no ionizantes y clasificación por tipo de servicios	91
Tabla 55. Límites máximos de exposición según frecuencia de operación del emisor de servicios de telecomunicación hasta 300 GHz	92
Tabla 56. Valores del factor de ponderación de la radiación W _r	93
Tabla 57. Límites de dosis según persona expuesta y tiempo de exposición	94
Tabla 58. Actividades que generan olores ofensivos y sustancias asociadas.....	95
Tabla 59. Umbrales de percepción del olor y nivel máximo de concentración permisible de sustancias que generan olores ofensivos.....	97
Tabla 60. Estándares máximos permisibles de ruido por horario y tipo de sector.....	98
Tabla 61. Efectos de diferentes niveles de vibración en el cuerpo humano	101
Tabla 62. Interpretación de rangos y niveles de fragmentación	108
Tabla 63. Interpretación del índice de vegetación natural remanente	111
Tabla 64. Valores de ponderación de acuerdo con el coeficiente de determinación	114
Tabla 65. Interpretación de los valores del IPPH.....	114
Tabla 66. Puntajes de las familias de macroinvertebrados para BMWP/Col	115
Tabla 67. Interpretación del índice BMWP/Col	116
Tabla 68. Puntuaciones del índice Biótico Andino (IBA) para las familias de macroinvertebrados de los Andes en alturas desde 2000 m.s.n.m.....	117
Tabla 69. Interpretación del índice IBA.....	119
Tabla 70. Valores de tolerancia mínima de macroinvertebrados en la Sabana de Bogotá	120
Tabla 71. Interpretación del Índice de tolerancia mínima de macroinvertebrados Sabana de Bogotá	121
Tabla 72. Macroinvertebrados bénticos encontrados en la cuenca del río Negro con los correspondientes registros óptimos (Op _i) y de tolerancia (To _i)	122
Tabla 73. Interpretación del ICE _{RM-MAE}	124
Tabla 74. Parámetros hidráulicos y de calidad para el IEL.....	124
Tabla 75. Factores de ponderación (Vi) para las variables del IEL y el IELP	125
Tabla 76. Clasificación limnológica de acuerdo con el IEL	128
Tabla 77. Interpretación del resultado del IIBM para ecosistemas acuáticos	129
Tabla 78. Interpretación del índice ICOL y los Índices Bióticos (IB) de cada comunidad	131
Tabla 79. Interpretación del índice de cambio de superficie de bosque natural	132
Tabla 80. Descripción general de las coberturas de primer nivel según la metodología CORINE Land Cover para Colombia	133
Tabla 81. Interpretación del índice de promedio anual de la variación de la superficie por tipo de cobertura	134
Tabla 82. Ecosistemas continentales naturales.....	135
Tabla 83. Categorías de amenaza de la lista roja de especies en peligro.....	140

Tabla 84. Interpretación del porcentaje de infestación de especies invasoras e introducidas por grupo taxonómico	142
Tabla 85. Interpretación del índice de diversidad Margalef	143
Tabla 86. Interpretación del índice de diversidad Simpson	145
Tabla 87. Interpretación del índice de diversidad Jaccard	150
Tabla 88. Interpretación del índice Shannon	154
Tabla 89. Variables de análisis para la estimación de las Necesidades Básicas Insatisfechas.	159
Tabla 90. Relación entre servicios sociales tipo j y las unidades de referencia tipo i	162
Tabla 91. Clasificación de generadores de acuerdo con la cantidad de residuos peligrosos generados	167
Tabla 92. Tipos de materiales, características y ejemplos de usos	168
Tabla 93. Ponderadores para el índice de precios al consumidor según por grupo poblacional según condición económica.	172
Tabla 94. Categorías de personas de la PEA.....	173
Tabla 95. Interpretación del índice relativo del cambio del valor del avalúo catastral	175
Tabla 96. Interpretación del índice relativo del cambio del valor del avalúo catastral	175
Tabla 97. Dimensiones, variables y criterios de privación del Índice de Pobreza Multidimensional	177
Tabla 98. Rangos de edad y nivel de escolaridad asociado por parte del Ministerio de Educación Nacional (MEN).	182
Tabla 99. Lista de adjetivos jerárquicos y correlación con valor numérico	184
Tabla 100. Factores para evaluar la fragilidad de un paisaje	185
Tabla 101. Evaluación de la calidad y la fragilidad visual de los paisajes	186
Tabla 102. Capacidad de uso de un paisaje de acuerdo con sus características de calidad y fragilidad	186
Tabla 103. Componentes y variables del Índice de Vulnerabilidad Territorial (IVT)	187
Tabla 104. Ponderadores para las líneas estratégicas y las variables correspondientes.....	188
Tabla 105. Niveles de vulnerabilidad asociados a los promedios de IVT para el año 2012	189
Tabla 106. Comportamiento genérico de un plaguicida en función de su presión de vapor.....	190
Tabla 107. Comportamiento genérico de un plaguicida en función de su solubilidad	190
Tabla 108. Comportamiento genérico de un plaguicida en función de su constante de la Ley de Henry.....	191
Tabla 109. Comportamiento del plaguicida en función del coeficiente de adsorción de carbono orgánico	192
Tabla 110. Comportamiento del plaguicida en función del K_{ow}	194
Tabla 111. Valores de Log K_{ow} y Log K_{oc} para los plaguicidas de uso común.....	194
Tabla 112. Interpretación del cociente de riesgo ambiental agudo.....	195
Tabla 113. Categorización para DL50 en roedores	196
Tabla 114. Categorización para DL50 y CL50 oral en aves	196
Tabla 115. Categorización para especies acuáticas (peces e invertebrados acuáticos)	196
Tabla 116. Categorización para abejas	196
Tabla 117. Clasificación de los plaguicidas de acuerdo a su persistencia.....	197
Tabla 118. Potencial de contaminación de agua subterránea para plaguicidas	198

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Extensión promedio de los términos de referencia	20
Figura 2. Extensión promedio de los términos de referencia para EIA por sector	20
Figura 3. Requerimientos de información por medio	21
Figura 4. Requerimientos de información por componente ambiental	22
Figura 5. Requerimientos de información por TdR	23
Figura 6. Procedimiento de medición de la designación de la calidad de la roca	28
Figura 7. Límites de Atterberg	46
Figura 8. Clasificación general de los Compuestos Orgánicos Volátiles	87
Figura 9. Curva de calidad de saturación de oxígeno	126
Figura 10. Curva de calidad de pH	126
Figura 11. Curva de calidad de Nitrato	126
Figura 12. Curva de calidad de Fósforo Total	126
Figura 13. Curva de calidad de la relación N/P	127
Figura 14. Curva de calidad de conductividad	127
Figura 15. Curva de calidad de la relación A/V	127
Figura 16. Curva de calidad de Clorofila	127
Figura 17. Curva de calidad de CPUE	127
Figura 18. Curva de calidad del Índice Nygaard	127
Figura 19. Curva de calidad de BMWP	128
Figura 20. Curva de calidad de ASPT	128
Figura 21. Procedimiento de análisis, interpretación y cálculo de las áreas de cobertura	138
Figura 22. Clasificación de residuos sólidos	167

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AA	Autoridades Ambientales
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
BD	Base de datos
CFC	Compuestos clorofluorocarbonados
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
COP	Contaminantes Orgánicos Persistentes
COV	Compuestos orgánicos volátiles
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EES	Estructura Ecológica de Soporte
EIA	Estudios de impacto ambiental
ICA	Informes de cumplimiento ambiental
ICA	Índice de calidad del aire
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
MGPEA	Metodología general para la presentación de estudios ambientales
PCB	Bifenilos Policlorados
PMA	Plan de manejo ambiental
POA	Proyectos, obras o actividades
PPN	Producción primaria neta
RAE	Real Academia de la Lengua Española
SST	Sólidos suspendidos totales
SVCA	Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire
TdR	Términos de referencia

INTRODUCCIÓN

Con el propósito de mejorar la eficacia del proceso de licenciamiento ambiental y por ende, contribuir a que cumpla con su objetivo de asegurar el uso racional de los recursos naturales renovables, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible –Minambiente-, viene adelantando un conjunto de actividades que buscan generar herramientas técnicas que contribuyan a la estandarización de conceptos, la elaboración de estudios ambientales robustos, el seguimiento al estado de los recursos naturales renovables mediante indicadores, y la transparencia en la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales.

En este contexto, se ha propiciado la actualización de las herramientas técnicas y normativas asociadas al licenciamiento ambiental, entre las que se encuentran: la *Metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales (MGEPEA)*, el *Manual de evaluación de estudios ambientales*, el *Manual de seguimiento ambiental de proyectos* y los *Términos de referencia (TdR)* para los diferentes proyectos, obras o actividades (POA) sujetos a licencia ambiental.

Teniendo en cuenta que del núcleo del licenciamiento ambiental, como proceso de toma de decisiones, hace parte la caracterización del ambiente, y que ésta constituye un insumo fundamental para la evaluación de los impactos ambientales atribuibles a los POA, que puedan producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje. En este documento se presenta un conjunto de indicadores que permiten sintetizar la información incluida en los estudios de impacto ambiental (EIA), dentro del capítulo de caracterización del área de influencia del proyecto, para los medios abiótico, biótico y socioeconómico¹.

Este conjunto de indicadores permitirá a los evaluadores de los EIA, de las autoridades ambientales, el identificar los elementos más sensibles del área de influencia, así como también permitirá a los solicitantes de la licencia ambiental, el establecer niveles de referencia contra los cuales comparar el estado de los componentes y factores ambientales, para determinar el impacto real de sus operaciones y la eficacia de las medidas de manejo incluidas en el PMA, durante la ejecución del proyecto, obra o actividad.

Así, este conjunto de indicadores tiene un doble propósito, por un lado sintetizar la información de la línea base, y por el otro, definir los niveles de referencia de los parámetros ambientales que fueron caracterizados durante la elaboración del EIA. Por tanto, pueden ser empleados para evaluar los impactos ambientales y servir de insumo para definir los indicadores de eficacia de las medidas de manejo, **si esto contribuye a determinar con mayor precisión la tendencia del medio**. Por esta razón, *el banco de indicadores para el proceso de licenciamiento ambiental* es de utilidad, tanto para los solicitantes o beneficiarios de una licencia, como para las autoridades ambientales y la ciudadanía en general.

El diseño de esta batería de indicadores se soporta en la revisión de los requerimientos de información establecidos en los 54 TdR publicados en la página web de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales –ANLA-, para la elaboración de los DAA (Diagnóstico Ambiental de Alternativas), EIA (Estudio de Impacto Ambiental) y PMA (Plan de Manejo Ambiental). Adicionalmente, su estructuración consideró los requerimientos de información incluidos en la MGEPEA y otros documentos técnicos o literatura especializada en el área de la evaluación de impacto ambiental.

¹ Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.2.3.5.1. numeral 2

Es importante tener en cuenta que el compendio de indicadores presentado no es exhaustivo, y que tiene un carácter dinámico, en la medida en la que se actualicen los requerimientos de información de los TdR y demás instrumentos transversales del proceso (MGEPEA, Manuales de evaluación y seguimiento, entre otros). De este modo, el *Banco de indicadores para el proceso de licenciamiento ambiental* constituye una referencia técnica, factible de ser actualizada periódicamente, que busca sintetizar la información presentada en el EIA para facilitar la toma de decisiones.

El presente documento se compone de 3 secciones principales: 1) el enfoque metodológico, 2) el análisis de los requerimientos de información de los TdR, y 3) los indicadores ambientales. En el *enfoque metodológico* se presentan las consideraciones conceptuales y procedimentales, que se tuvieron en cuenta al momento de establecer los requerimientos de información. Mediante el *análisis de los requerimientos de información de los TdR*, se buscó identificar los parámetros ambientales solicitados en los EIA, de manera que se constituyan en un insumo para el diseño o construcción de los indicadores, sin que esto represente una sobrecarga en cuanto a la información solicitada. Finalmente, se presenta una batería de 155 *indicadores ambientales*, que articulan los requerimientos de información de los EIA con las categorías estandarizadas de impactos (CEI), definidas en conjunto por el Minambiente y la ANLA, y por ende, con el *Listado de impactos ambientales específicos* (LIAE).

ACLARACIONES FRENTE A LA APLICABILIDAD DEL BANCO DE INDICADORES PARA EL PROCESO DE LICENCIAMIENTO AMBIENTAL

Como se mencionó en la introducción de este documento, *el banco de indicadores para el proceso de licenciamiento ambiental*, está orientado a sintetizar la información incluida en los estudios de impacto ambiental (EIA), dentro del capítulo de caracterización del área de influencia del proyecto, para los medios abiótico, biótico y socioeconómico². Por tanto no es obligatorio el cálculo de todos y cada uno de ellos. Se deben calcular cuando los requerimientos de información de los TdR y la MGEPEA exijan la presentación de la información necesaria para su evaluación. Por ejemplo, si un término de referencia no solicita caracterizar el componente geológico, porque el proyecto no tiene incidencia sobre él, no será necesario evaluar ningún indicador relacionado con este componente.

En este mismo sentido, se aclara que los indicadores se deben evaluar con la información incluida en los EIA, que a su vez está determinada por los TdR, por lo cual no será necesario que se genere información adicional, excepto en los casos en los que la información disponible no tenga la calidad, el nivel de detalle requerido o no se encuentre actualizada. Para estos casos será necesario completar, actualizar y/o precisar la información. Con esto se busca que la calidad de la información de los EIA mejore y que se concrete, de manera que para el evaluador de la autoridad ambiental sea más claro establecer cuáles son los componentes del ambiente con mayor vulnerabilidad y por ende, profundizar en la revisión de la información relacionada con dichos elementos.

Para implementar esta propuesta es necesario que se surta un proceso de actualización de los TdR, de manera que se incluyan de forma explícita, los indicadores a evaluar para cada tipo de POA, en función de los requerimientos de información establecidos. Por lo tanto, *el banco de indicadores para el proceso de licenciamiento ambiental* constituye un avance a partir del cual, las autoridades ambientales deberán incorporar aquellos que consideren adecuados, u otros alternativos, siempre que permitan cumplir el objetivo de sintetizar la línea base e identificar los componentes y factores ambientales con mayor nivel de vulnerabilidad, frente a la ejecución del proyecto, obra o actividad que solicita la licencia.

Igualmente, en caso de que la autoridad ambiental competente considere que, una vez se haya obtenido la licencia ambiental, evaluar el indicador puede contribuir en el seguimiento del proyecto, este requerimiento debe ser incorporado en el acto administrativo de otorgamiento de la licencia. De manera que se logre determinar por parte del licenciataria la frecuencia de medición y reporte, así como las variaciones necesarias, con el propósito de garantizar el mejor uso posible a este banco de indicadores. No obstante, si la autoridad ambiental ha establecido otros procedimientos o instrumentos y no es útil el emplear estos indicadores, su cálculo solo sería requerido en la presentación del EIA, para su evaluación. Por lo anterior, el banco de indicadores no se contrapone a los desarrollos de las autoridades ambientales, sino que busca complementarlos.

De esta manera *el banco de indicadores para el proceso de licenciamiento ambiental* permitirá a los evaluadores de los EIA, de las autoridades ambientales, el identificar los aspectos más sensibles del área de influencia. Mientras que para los solicitantes o beneficiarios de la licencia ambiental, permitirá establecer los niveles de referencia sobre los cuales comparar el estado de los componentes ambientales, para determinar el impacto real de sus operaciones y establecer la eficacia de las medidas de manejo incluidas en el PMA, durante la ejecución del POA.

² Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.2.3.5.1. numeral 2

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario insistir en que los indicadores buscan sintetizar la información de la línea base, y definir los niveles de referencia de los parámetros ambientales que fueron caracterizados durante la elaboración del EIA. Por tanto, pueden ser empleados para evaluar los impactos ambientales y servir de insumo para definir los indicadores de eficacia de las medidas de manejo, cuando esto contribuya a evaluar el impacto de manera cuantitativa (por ejemplo al emplear la metodología Battelle-Collumbus) o para determinar con mayor precisión la tendencia del medio, en la fase de seguimiento. Por esta razón, *el banco de indicadores para el proceso de licenciamiento ambiental* es de utilidad, tanto para los solicitantes o beneficiarios de una licencia, como para las autoridades ambientales y la ciudadanía en general.

Finalmente se aclara que las autoridades ambientales podrán complementar este banco de indicadores, incorporando aquellos que sean necesarios para sintetizar la caracterización del medio, siempre y cuando contribuyan a establecer con precisión el estado del ambiente en el escenario de línea base; y que su interpretación se realice de conformidad con los rangos, escalas o categorías establecidas por el autor, la entidad o institución que formuló el indicador; o lo que la ciencia y la tecnología han establecido en una fuente de consulta verificable y de carácter técnico, como pueden ser los artículos científicos de revistas indexadas, los libros y las publicaciones especializadas, la normativa ambiental, los manuales, guías técnicas o demás información publicada en las páginas web de las instituciones pertenecientes al Sistema Nacional Ambiental – SINA-. Para lo cual deberán proporcionar la información relacionada con el indicador en los TdR específicos o incluirlos en la actualización de sus TdR genéricos, en los POA de su competencia, de manera que el solicitante pueda considerarlos desde la etapa de planeación del EIA.

ENFOQUE METODOLÓGICO

Con el propósito de obtener los insumos para la construcción del banco de indicadores que permita sintetizar la información de la caracterización del ambiente en los EIA, así como también, evaluar y hacer seguimiento a los impactos ambientales de los proyectos, obras o actividades (POA) sujetos a licencia ambiental; se adelantó la construcción de una base de datos en la que se relacionó la información requerida en los 54 términos de referencia (TdR) publicados en la página web de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales –ANLA–.

Tabla 1. TdR revisados para la identificación de los requerimientos de información

Nº	Sector	Documento	Código	Tipo	Resolución	Año	Páginas
1	Plaguicidas	TdR para la elaboración del EIA para importación de Pesticidas de tipo biológico para uso agrícola #12, art. 8	PL-TER-1-02	EIA	1254 del 30 de junio de 2006	2006	31
2	Plaguicidas	TdR para la elaboración del EIA para la construcción y operación de plantas de producción de plaguicidas	PL-TER-1-01	EIA	No publicado	2006	47
3	Plaguicidas	TdR para el EIA de la Importación de Sustancias que Afectan la Capa de Ozono - SAO y/o Contribuyen al Calentamiento Global	Sin código	EIA	No publicado	2011	8
4	Plaguicidas	TdR para importación de pesticidas de tipo biológico para uso agrícola	Sin código	EIA	No publicado	2010	23
5	Plaguicidas	TdR para la introducción de organismos vivos de especies exóticas como agentes de control biológico de plagas	Sin código	EIA	No publicado	2010	28
6	Plaguicidas	TdR para importación de plaguicidas químicos para uso doméstico, industrial y salud pública	Sin código	EIA	No publicado	2010	36
7	Plaguicidas	TdR para importación de plaguicidas químicos para uso veterinario	Sin código	EIA	No publicado	2010	41
8	Distritos de Riego	TdR para la elaboración del EIA para la construcción y operación de distritos de riego y/o drenaje con cobertura superiores a 20.000 hectáreas	DR-TER-1-01	EIA	1286 del 30 de junio de 2006	2006	41
9	Flora	TdR para la elaboración del EIA para actividades de introducción y aprovechamiento de especies exóticas	FL-TER-1-01	EIA	1293 del 30 de junio de 2006	2006	35
10	Fauna	TdR Para la elaboración del EIA para la introducción y zootecia de parentales exóticos	FA-TER-1-01	EIA	1259 del 30 de junio de 2006	2006	37
11	Fauna	TdR para la elaboración de EIA para actividades de caza comercial	FA-TER-1-02	EIA	1292 del 30 de junio de 2006	2006	45
12	Energía, Represas, Trasvases y Embalses Hidroeléctricas	TdR para la elaboración del DAA para proyectos puntuales	DA-TER-4-01	DAA	1255 del 30 de junio de 2006	2006	28
13	Energía, Represas, Trasvases y Embalses Hidroeléctricas	TdR para la elaboración del EIA para la construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctricas.	TDR-014	EIA	1519 del 26 de julio de 2017	2017	151
14	Energía, Represas, Trasvases y Embalses Hidroeléctricas	TdR para la elaboración del DAA en proyectos de uso de biomasa para generación de energía	TDR-016	DAA	1910 del 14 de septiembre de 2017	2017	56
15	Eólica	TdR para la elaboración del EIA en proyectos de uso de energía eólica continental.	TDR-09	EIA	1312 del 11 de Agosto de 2016	2016	112
16	Solar	TdR para la elaboración del EIA en proyectos de uso de energía solar fotovoltaica.	TDR-015	EIA	1670 del 15 de Agosto de 2017	2017	120
17	Líneas	TdR para la elaboración del DAA para proyectos lineales	DA-TER-3-01	DAA	1277 del 30 de junio de 2006	2006	24
18	Líneas	TdR para la elaboración del DAA en proyectos de sistemas de transmisión de energía eléctrica	TDR-11	DAA	2183 del 23 de diciembre de 2016	2016	50
19	Líneas	TdR para la elaboración del EIA - EIA Proyectos de Sistemas de transmisión de energía eléctrica	TDR-17	EIA	0075 del 18 de enero de 2018	2018	131

N°	Sector	Documento	Código	Tipo	Resolución	Año	Páginas
20	Termoeléctricas	TdR para la elaboración del DAA para proyectos puntuales	DA-TER-4-01	DAA	1258 del 30 de junio de 2006	2006	28
21	Termoeléctricas	TdR para la elaboración del EIA para la construcción y operación de centrales térmicas generadoras de energía eléctrica con capacidad instalada igual o superior a 100 MW	TE-TER-1-01	EIA	1287 del 30 de junio de 2006	2006	47
22	Presas, Represas o Embalses	TdR para la elaboración del EIA para la construcción de presas, represas y embalses con capacidad mayor de 200 millones de metros cúbicos de agua	PR-TER-1-01	EIA	1284 del 30 de junio de 2006	2006	43
23	Transvase de cuenca	TdR para la elaboración de EIA , para proyectos que requieran trasvase de una cuenca a otra corriente de agua que excedan de 2 M3/seg durante los periodos de mínimo caudal	TR-TER-1-01	EIA	1270 del 30 de junio de 2006	2006	42
24	Infraestructura	TdR para la elaboración del DAA para proyectos puntuales	DA-TER-4-01	DAA	1257 del 30 de junio de 2006	2006	28
25	Infraestructura	TdR para la elaboración del EIA en proyectos de construcción y operación de aeropuertos internacionales y de nuevas pistas en los mismos.	M-M-INA-04	EIA	0114 del 28 de enero de 2015	2015	92
26	Vías	TdR para la elaboración del DAA en proyectos lineales de infraestructura de transporte (vías carreteras y líneas férreas, incluyendo túneles)	TDR-022	DAA	1258 del 10 de julio de 2018	2018	65
27	Vías	TdR para la elaboración del EIA en proyectos de construcción de carreteras y/o túneles.	M-M-INA-02 V.2	EIA	0751 del 26 de marzo de 2015	2015	94
28	Vías	TdR para la elaboración del EIA en proyectos de construcción de líneas férreas	TDR-03	EIA	0750 del 07 de abril de 2017	2017	139
29	Vías	TdR para la elaboración del EIA para la construcción de segundas calzadas en terreno plano a semiondulado	VI-TER-1-02	EIA	1559 del 12 agosto de 2009	2009	30
30	Vías	TdR para la elaboración de la solicitud de inclusión de nuevas fuentes de materiales en proyectos de infraestructura de transporte.	TDR-08	EIA	1514 del 14 septiembre 2016	2016	30
31	Puertos	TdR para la elaboración del DAA para proyectos puntuales	DA-TER-4-01	DAA	1255 del 30 de junio de 2006	2006	28
32	Puertos	TdR para la elaboración del EIA en proyectos de construcción o ampliación y operación de puertos fluviales.	M-M-INA-06	EIA	0327 del 17 de febrero de 2015	2015	104
33	Puertos	TdR para la elaboración del EIA para las actividades de dragados de profundización de los canales de acceso a puertos marítimos de gran calado	PU-TER-1-01	EIA	1272 del 30 junio de 2006	2006	35
34	Puertos	TdR para la elaboración del EIA para proyectos de construcción y/o ampliación de puertos marítimos de gran calado	M-M-INA-05	EIA	0112 del 28 de enero de 2015	2015	104
35	Puertos	TdR para la elaboración del EIA para los proyectos de dragado de profundización de canales navegables y en áreas de deltasal	PU-TER-1-03	EIA	1273 del 30 junio de 2006	2006	34
36	Puertos	TdR para la elaboración del EIA para proyectos de cierre de brazos y madrevejas activos	PU-TER-1-04	EIA	1282 del 30 junio de 2006	2006	31
37	Infraestructura	TdR para la solicitud de inclusión de nuevas fuentes de materiales en proyectos de infraestructura de transporte.	TDR-08	EIA	1514 del 14 de septiembre de 2016	2016	30
38	Obras marítimas duras	TdR para la elaboración del EIA en proyectos de construcción de obras marítimas duras de control y protección costera, y de regeneración de dunas y playas.	TDR-07	EIA	1660 del 11 de octubre de 2016	2016	112
39	Aguas residuales	TdR para la elaboración del EIA para la construcción y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas	AR-TER-1-01	EIA	1285 del 30 de junio de 2006	2006	47

N°	Sector	Documento	Código	Tipo	Resolución	Año	Páginas
40	Rellenos Sanitarios	TdR para la elaboración del EIA para la construcción y operación de rellenos sanitarios	RS-TER-1-01	EIA	1274 del 30 junio de 2006	2006	37
41	Minero	TdR para la elaboración del EIA Proyectos de explotación minera	TDR-13	EIA	2206 del 27 de diciembre de 2016	2016	159
42	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del EIA para los proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos	M-M-INA-01	EIA	0421 de 20 de marzo de 2014	2014	113
43	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del EIA para los proyectos de explotación de hidrocarburos	HI-TER-1-03	EIA	1543 del 6 de agosto de 2010	2010	51
44	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del DAA para proyectos lineales	DA-TER-3-01	DAA	1277 del 30 de junio de 2006	2006	24
45	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del EIA para la conducción de fluidos por ductos en el sector de hidrocarburos	HI-TER-1-05	EIA	1275 del 30 de junio de 2006	2006	43
46	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del EIA , para terminales de entrega y estaciones de transferencia de hidrocarburos líquidos	HI-TER-1-06	EIA	1253 del 30 de junio de 2006	2006	42
47	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del DAA para proyectos puntuales	DA-TER-4-01	DAA	1256 del 30 de junio de 2006	2006	28
48	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del EIA para la construcción y operación de refinerías y los desarrollos petroquímicos que formen parte de un complejo de refinación	HI-TER-1-07	EIA	1269 del 30 de junio de 2006	2006	39
49	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del EIA en proyectos de exploración sísmica marina en profundidades menores a 200 m.	TDR-10	EIA	2205 del 27 de diciembre de 2016	2016	62
50	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del PMA para la perforación de pozos exploratorios	HTER210	PMA	No publicado	Sin fecha	21
51	Hidrocarburos	TdR para la elaboración del PMA para la perforación de pozos de desarrollo o producción y sus líneas de flujo	HTER310	PMA	No publicado	Sin fecha	24
52	Aguas residuales	TdR para la construcción y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas	AR-TER-1-01	EIA	No publicado	2006	47
53	Rellenos Sanitarios	TdR para el DAA de rellenos sanitarios	Sin código	DAA	No publicado	2006	13
54	Eólica	TdR para la elaboración del EIA en proyectos de uso de energía eólica continental	TDR-09	EIA	No publicado	2016	112

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos publicados por ANLA³

Como elemento estructurador de la información, se partió por un modelo de categorización del ambiente, empleando los conceptos de medio, componente y factor ambiental. Los dos primeros de uso común en la *Metodología general para la presentación de estudios ambientales* y en los TdR de los POA sujetos a licencia ambiental; mientras que el tercero es empleado habitualmente en la literatura técnica, como un recurso que permite dar mayor detalle y profundidad a la clasificación, pero que no se ha incorporado de manera explícita en los documentos que soportan el proceso de licenciamiento ambiental en Colombia.

Un ejemplo del uso de este concepto lo presenta Arboleda (1998). Para este autor, aunque el concepto de ambiente es integral, su amplitud y complejidad hace necesario desagregarlo en partes que puedan ser más fácilmente manejables, para lo cual propone la clasificación que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelo de clasificación del ambiente de Arboleda

Medio	Componente	Factores ambientales
Físico	Clima	Precipitación, Temperatura, Humedad relativa, Vientos, Pisos térmicos, Evaporación, Brillo solar
	Geología	Erodabilidad, Estabilidad, Capacidad portante, Permeabilidad, Facilidad de excavación, Tipo de roca, Estratificación, Esquistocidad, Diaclasas, Fallas, Sismicidad, Perfiles estratigráficos
	Geomorfología	Formas topográficas (Fisiografía, Complejidad, Topográfica, Desniveles), Pendiente o relieve, Áreas de inundación, Focos y procesos erosivos
	Suelos	Propiedades físicas (Textura, Estructura, Profundidad, Drenaje, Humedad), Propiedades químicas (Fertilidad, Relación C/N, Conductividad), Unidades edafológicas, Perfiles (estratos), Usos actuales y potenciales
	Aire	Partículas, Ruido, Gases, Olores
	Agua (superficial y subterránea)	Factores hidrológicos (Caudales y niveles máximos, mínimo, medios; Red de drenaje; Niveles freáticos; Escorrentía superficial), Factores de calidad (Olor, Color, Temperatura, Turbidez, Transparencia, Oxígeno disuelto, DBO, DQO), Usos actuales y potenciales, Transporte de sedimentos, Factores hidráulicos (Velocidades, Pendientes, Rugosidad), Factores básicos (pH; Acidez; Alcalinidad; Dureza; Sólidos; Coliformes; Carbono y nitrógeno orgánico total; Carbono, fósforo y nitrógeno; Conductividad; Sustancias tóxicas y metales pesados; Pesticidas y plaguicidas)
	Paisaje	Calidad visual, Color, Unidades de paisaje
Biótico	Vegetación terrestre o flora	Diversidad; Abundancia; Estructura; Productividad primaria; Distribución; Superficie ocupada; Especies endémicas, dominantes o amenazadas; Agroecosistemas; Formaciones vegetales
	Fauna terrestre	Diversidad, Abundancia, Estructura, Estado, Distribución, Migraciones, Vectores de enfermedades, Especies endémicas o amenazadas
	Biota acuática	Diversidad, Abundancia, Estructura, Estado, Distribución, Migraciones
Social	Demográfico	Factores relacionados con la salud (Presencia de enfermedades, Vectores de transmisión, Mortalidad y morbilidad, Esperanza de vida, Dieta alimenticia), Tasa de natalidad, Número de habitantes, Ocupación, Análisis de movimientos naturales y migratorios, Niveles de instrucción, Análisis de población activa, Estructura, Evolución, Densidad de población
	Político	Relaciones de poder, Expectativas de la comunidad, Formas de organización existentes, Conflictos
	Económico	Volúmenes, flujos e infraestructura de producción, Niveles de productividad, Niveles de consumo, Estructura de la propiedad, Formas de tenencia de la tierra, Vulnerabilidad, Cobertura y calidad en los servicios públicos (Acueducto, Alcantarillado, Recolección de basuras, Electrificación, Comunicación, Vivienda, Educación)
	Cultural	Patrimoniales (Arqueológicos, Históricos, Culturales), Identidad, Estructura familiar, Niveles de arraigo, Vulnerabilidad, Religiosidad

Fuente: Arboleda (1998)

Una clasificación similar es propuesta por Martínez Bernal (2019), elaborada a partir de la revisión de Conesa (2010) y Garmendia, Salvador, Crespo y Garmendia (2005), la cual se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Modelo de clasificación del ambiente de Conesa

Medio	Componente	Factores ambientales
Físico	Geoformas	Geología, morfología, morfodinámica y morfoestructura
	Paisaje	Visibilidad, estructura, fisionomía, diversidad de unidades y estética característica
	Suelo	Uso, textura, estructura y fertilidad
	Agua	Hidromorfología, caudal, volumen de agua, calidad del agua, patrón de drenaje, régimen hidrológico y nivel freático
	Atmósfera	Calidad del aire, temperatura, precipitación, humedad, viento, radiación, clima, microclimas y ruido
Biótico	Flora	Coberturas vegetales, composición vegetal, distribución de flora y diversidad vegetal
	Fauna	Diversidad fauna, cadenas alimenticias, hábitat, población e hidrofauna
Social	Comunidad	Migraciones, ocupación del territorio, participación, bienestar social, conflictos y salud
	Infraestructura	Transporte, salud, educación, servicios sociales y servicios públicos
	Cultura	Tradiciones y costumbres, valores ciudadanos, educación y patrimonio arqueológico
	Economía	Mercados, comercio y empleo, propiedad de la tierra

Fuente: Elaborado a partir de Conesa (2010) y Garmendia, Salvador, Crespo y Garmendia (2005).

Como se observa en las tablas anteriores, el concepto de *factor ambiental* permite una desagregación más detallada de la información y por tanto, facilita el análisis de los requerimientos que actualmente se establecen en los TdR.

Con base en estos modelos, y la estructura planteada por la MGEPEA y los TdR, se elaboró una base de datos (BD) en el programa Microsoft Excel ® con los siguientes campos:

- **MEDIO:** Según la MGEPEA es una división general del ambiente, que se realiza para facilitar el análisis y entendimiento del mismo. En el contexto de los estudios ambientales corresponde a las categorías de abiótico, biótico y socioeconómico. También se incluyó la categoría General, en las que se incluyen el Paisaje y los Servicios ecosistémicos, dado que el análisis de estos componentes integran elementos de los tres medios.
- **COMPONENTE:** Corresponde a una subdivisión del medio, en la que se identifican el conjunto de organismos o aspectos que se estructuran o funcionan de tal manera, que pueden ser agrupados o definidos en forma lógica y permiten describir su comportamiento promedio bajo condiciones naturales (Arboleda, 1998). De acuerdo con la MGEPEA el *componente ambiental* corresponde a la unidad de análisis que agrupa factores ambientales, y que a su vez constituye uno de los elementos que conforman un medio. Por ejemplo, los componentes geológico, edafológico, hidrológico, hidrogeológico, oceanográfico y atmosférico, conforman el medio abiótico.

- **FACTOR:** Para Arboleda (1998) este nivel corresponde a los elementos, variables, características, parámetros o indicadores de primer nivel, que representan una determinada condición ambiental. Estos factores son las partes del ambiente que pueden ser afectables o susceptibles de modificación, deterioro o transformación y permiten identificar y en lo posible estimar, ya sea cualitativa o cuantitativamente, los efectos inducidos por una actividad, cuyas características puedan ser igualmente definidas.
- **SUBFACTOR:** Corresponde a una categoría intermedia que permite agrupar temáticas que están definidas en los TdR pero que no se reconocen como un factor ambiental. Por ejemplo: en la evaluación hidrogeoquímica de los proyectos de explotación minera, en la que se solicita información sobre los drenajes mineros ácidos (DMA) o la isotopía (cada uno de éstos grupos se introdujo en la base de datos como un subfactor).
- **INFORMACIÓN SOLICITADA:** Corresponde a la estandarización de la información requerida en los TdR. Se hace hincapié en el término *estandarizado* ya que no corresponde a la redacción textual, en todos los casos, sino a una generalización que permitió reducir la cantidad de registros (filas) en la base de datos, debido a alta la heterogeneidad de los requerimientos de información en los TdR.
- **PARÁMETROS:** De acuerdo con la Real Academia de la Lengua Española –RAE–, este término se aplica a los datos o factores necesarios para analizar o valorar una situación. Igualmente se aplica a las variables que, en una familia de elementos, sirven para identificar cada uno de ellos mediante su valor numérico. En la BD asocia las variables o información susceptible de ser medida de forma cualitativa o cuantitativa, o que brindan características del factor ambiental.

En la BD se relacionaron los requerimientos de información de los TdR para los POA priorizados, encontrando una amplia gama de variaciones en la solicitud de información, que es consecuencia de la heterogeneidad propia de los POA sujetos a la licencia ambiental, la evolución de estos instrumentos desde el año 2006 hasta 2020, y de la diversidad de criterios que se han ido incorporando en estos documentos. Respecto a la evolución de los TdR, es posible notar como se han ido incorporando requerimientos más específicos que hacen que los textos sean progresivamente más detallados. Muestra de esto es la extensión, que ha pasado de estar cercana a las 40 páginas para los que fueron expedidos en el año 2006, a más de 136 páginas en promedio para los adoptados en el año 2017 (Figura 1).

Por otra parte, es conveniente resaltar la diferenciación en el grado de detalle de los TdR a nivel de los sectores, siendo posible encontrar que -dentro de los TdR revisados- el sector con mayor cantidad de requerimientos es el de minería, mientras que otros sectores como hidrocarburos o la generación de energía mediante termoeléctricas muestran un nivel de detalle, requerimientos de información y una extensión considerablemente menor (Figura 2). Es importante resaltar que el análisis de los requerimientos de información se presentará más adelante en este mismo documento.

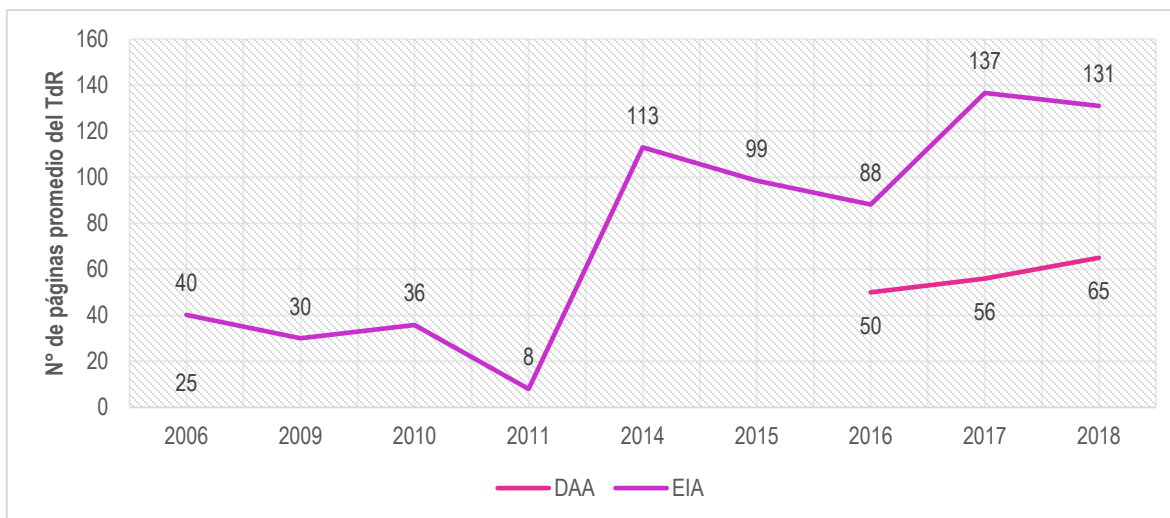


Figura 1. Extensión promedio de los términos de referencia

Fuente: elaborado a partir de los TdR

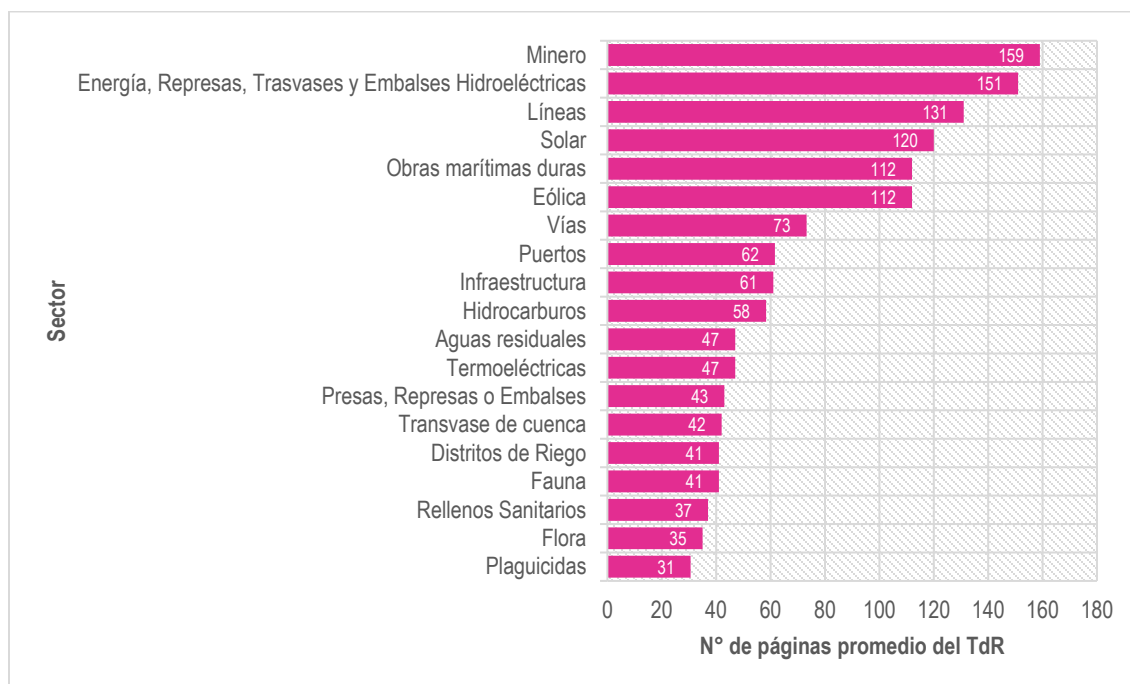


Figura 2. Extensión promedio de los términos de referencia para EIA por sector

Fuente: elaborado a partir de los TdR

Una vez extraída la información de los TdR e incorporada en la base de datos, se empleó el programa Microsoft Excel®, su complemento Power Query y tablas dinámicas, para proceder con su análisis. En la siguiente sección se presentan los resultados más relevantes de esta revisión.

ANÁLISIS DE LOS REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN DE LOS TdR

Como se mencionó anteriormente, la revisión de los requerimientos de información establecidos para el capítulo de caracterización del ambiente en los TdR, demuestra una alta heterogeneidad en cuanto al volumen de información requerida para los diferentes medios y para los diferentes POA. Un ejemplo de esta disparidad es el hecho de que mientras que para el medio abiótico se identificaron 824 requerimientos de información, con 926 parámetros asociados, para el medio biótico solo se identificaron 265 requerimientos y 379 parámetros (Figura 3).

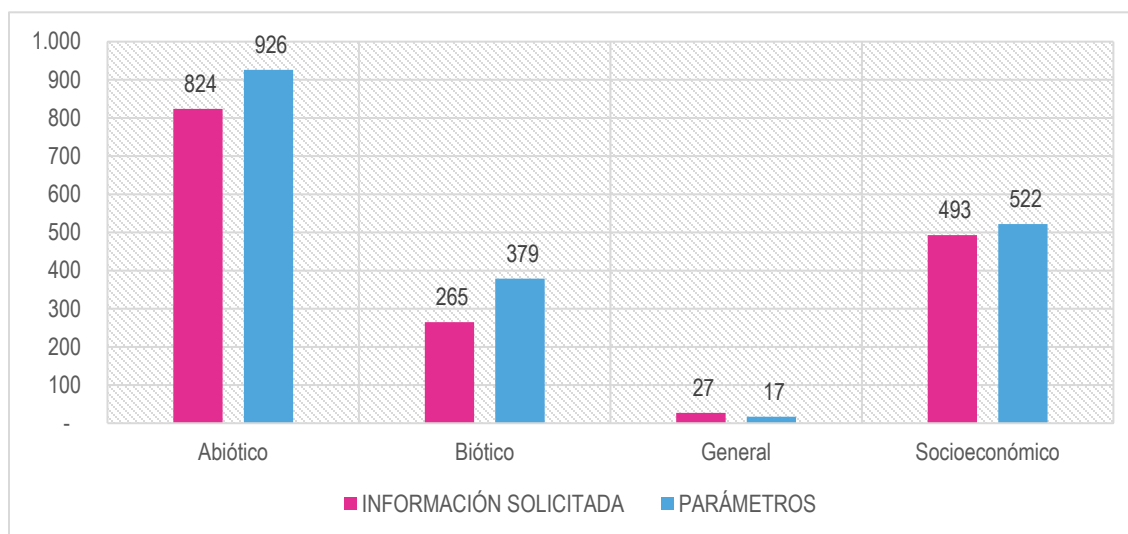


Figura 3. Requerimientos de información por medio

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión de los TdR

Estas diferencias están asociadas al alto número de componentes que se analizan en el medio abiótico y al hecho de que sobre éstos se han definido un amplio número de características susceptibles de ser descritas de forma cualitativa o medidas de forma cuantitativa. Igualmente hay que considerar que la normatividad ambiental ha establecido variables, parámetros, límites permisibles, protocolos de medición y monitoreo de una gran cantidad de elementos asociados a la atmosfera, el agua, el suelo, etc. por mencionar algunos ejemplos. También es importante resaltar la amplitud de los aspectos analizados en el medio social, en donde se identificaron 493 requerimientos de información asociados a 522 parámetros.

Por su parte, el medio biótico, el número reducido de componentes ambientales y a las dificultades propias de caracterizar estos elementos, hace que presente una menor cantidad de solicitudes de información. Otro factor a considerar es que en el medio biótico, específicamente para el caso de la fauna, sólo se requiere información de algunos grupos taxonómicos, como mamíferos, reptiles, anfibios y aves, por lo que un amplio número de grupos no están siendo considerados (por ejemplo insectos, fauna edáfica, etc.) de manera generalizada.

En cuanto a los componentes ambientales, los que presentaron el mayor número de requerimientos de información fueron el geológico (253), hidrológico (175), hidrogeológico (158), atmosférico (155) y cultural (152). Los que menos solicitudes acopiaron fueron los componentes de salud (3), participación y socialización (8), servicios ecosistémicos (8), arqueológico (11) y de paisaje (19) (Figura 4).

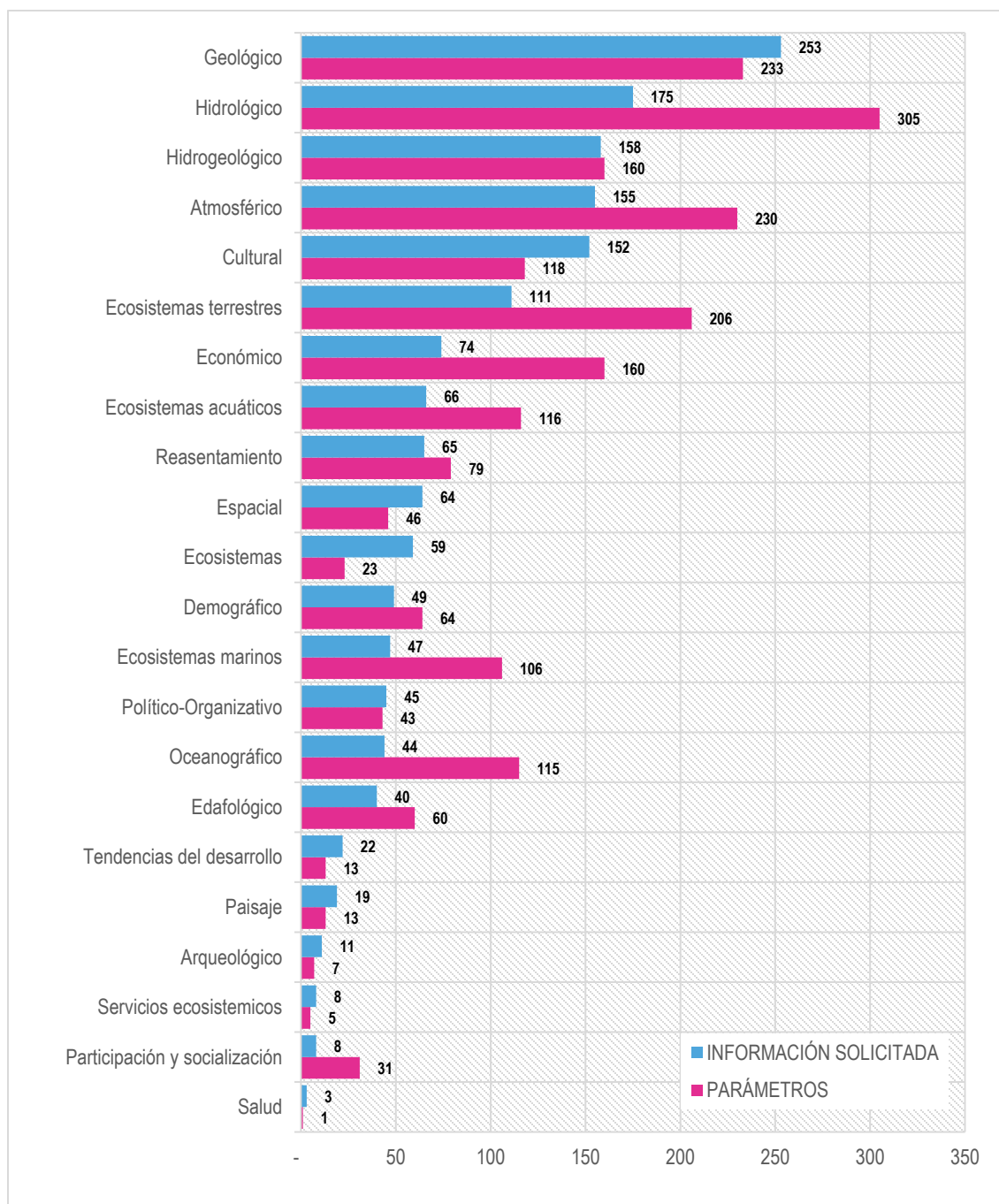


Figura 4. Requerimientos de información por componente ambiental

Fuente: elaboración propia a partir de la revisión de los TdR

En cuanto a los sectores, se evidencian diferencias la información requerida (para los 54 TdR revisados), encontrando que por ejemplo para la actividad minera el número de solicitudes de información es de 1.121, mientras que para la construcción y operación de rellenos sanitarios, el número de solicitudes de información es de 304 (Figura 5 y Tabla 4).

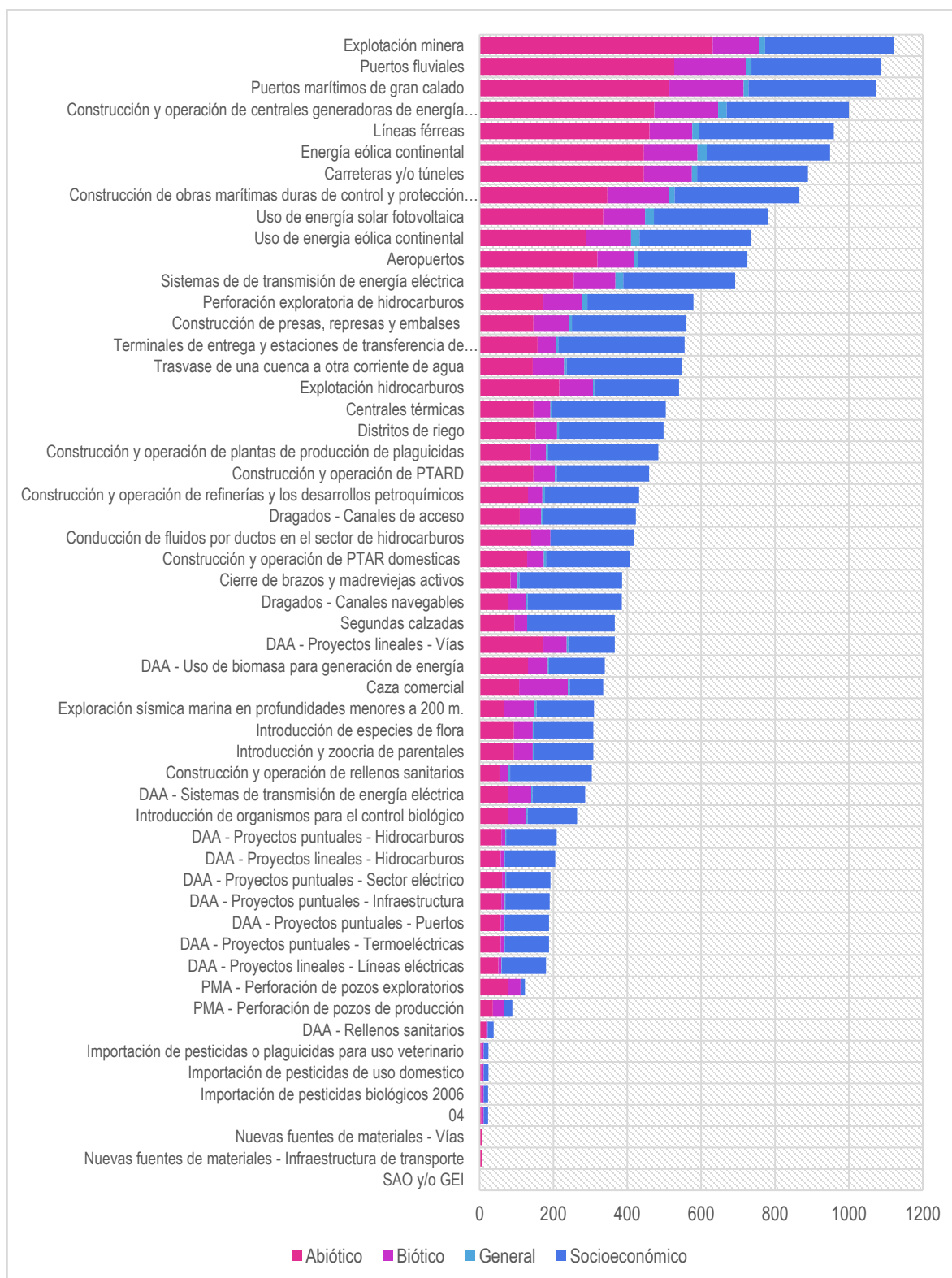


Figura 5. Requerimientos de información por TdR

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión de los TdR

Tabla 4. Requerimientos de información por TdR

POA	Abiótico	Biótico	General	Socioeconómico	Total
SAO y/o GEI	0	0	0	0	0
Nuevas fuentes de materiales - Infraestructura de transporte	6	1	0	0	7
Nuevas fuentes de materiales - Vías	6	1	0	0	7
Importación de pesticidas biológicos 2011	5	6	0	12	23
Importación de pesticidas biológicos 2006	5	6	0	12	23
Importación de pesticidas o plaguicidas para uso veterinario	5	6	0	13	24
Importación de pesticidas de uso domestico	5	6	0	13	24
DAA - Rellenos sanitarios	17	5	0	16	38
PMA - Perforación de pozos de producción	36	31	0	22	89
PMA - Perforación de pozos exploratorios	78	33	1	11	123
DAA - Proyectos lineales - Líneas eléctricas	51	8	1	120	180
DAA - Proyectos puntuales - Termoeléctricas	57	9	2	120	188
DAA - Proyectos puntuales - Puertos	57	9	2	120	188
DAA - Proyectos puntuales - Infraestructura	59	9	2	120	190
DAA - Proyectos puntuales - Sector eléctrico	61	9	2	120	192
DAA - Proyectos lineales - Hidrocarburos	57	9	2	137	205
DAA - Proyectos puntuales - Hidrocarburos	59	11	2	137	209
Introducción de organismos para el control biológico	77	50	3	134	264
DAA - Sistemas de transmisión de energía eléctrica	77	63	3	143	286
Construcción y operación de rellenos sanitarios	54	24	5	221	304
Introducción y zootecnia de parentales	93	51	3	161	308
Introducción de especies de flora	93	51	3	161	308
Exploración sísmica marina en profundidades menores a 200 m.	67	80	7	156	310
Caza comercial	107	132	5	91	335
DAA - Uso de biomasa para generación de energía	131	54	3	151	339
Segundas calzadas	94	35	0	237	366
DAA - Proyectos lineales - Vías	173	63	4	126	366
Dragados - Canales navegables	78	48	4	255	385
Cierre de brazos y madrevejas activos	84	19	5	278	386
Construcción y operación de PTAR domesticas	129	45	6	227	407
Conducción de fluidos por ductos en el sector de hidrocarburos	140	52	0	226	418

POA	Abiótico	Biótico	General	Socioeconómico	Total
Dragados - Canales de acceso	109	58	5	251	423
Construcción y operación de refinerías y los desarrollos petroquímicos	131	39	7	255	432
Construcción y operación de PTARD	146	58	5	250	459
Construcción y operación de plantas de producción de plaguicidas	138	42	6	298	484
Distritos de riego	152	58	5	283	498
Centrales térmicas	146	46	4	308	504
Explotación hidrocarburos	216	91	4	229	540
Trasvase de una cuenca a otra corriente de agua	144	85	7	311	547
Terminales de entrega y estaciones de transferencia de hidrocarburos líquidos	157	49	7	342	555
Construcción de presas, represas y embalses	146	97	7	310	560
Perforación exploratoria de hidrocarburos	173	105	14	287	579
Sistemas de transmisión de energía eléctrica	255	113	21	303	692
Aeropuertos	319	99	12	295	725
Uso de energía eólica continental	289	121	23	303	736
Uso de energía solar fotovoltaica	335	113	24	308	780
Construcción de obras marítimas duras de control y protección costera, y de regeneración de dunas y playas	346	167	15	338	866
Carreteras y/o túneles	445	130	14	300	889
Energía eólica continental	445	145	25	334	949
Líneas férreas	460	116	18	365	959
Construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctricas	473	173	23	331	1000
Puertos marítimos de gran calado	514	201	13	346	1074
Puertos fluviales	527	195	14	352	1088
Explotación minera	631	125	17	348	1121

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión de los TdR

Habiendo definido los requerimientos de información se identificaron los índices e indicadores que se solicitan en los TdR, para proceder a documentarlos, y se indagó frente a otros indicadores que podrían ser calculados con la información incluida en los EIA. De esta manera, *el banco de indicadores para el proceso de licenciamiento ambiental* hace uso de la información que ya está siendo requerida, por lo que no constituye una demanda adicional de información. A continuación se presenta un breve marco conceptual y posteriormente los indicadores seleccionados.

REFERENTES CONCEPTUALES

Los indicadores son mediciones sistemáticas que pueden ser verificadas en el tiempo por instancias públicas o privadas, para determinar el cumplimiento de metas o la comparación con parámetros de referencia planeados. Estos pueden ser de carácter cuantitativo o cualitativo y permiten describir características, comportamientos o fenómenos de la realidad; que pueden ser registrables en el tiempo y por lo tanto monitoreados. En particular, los indicadores ambientales buscan orientar el uso racional de los bienes naturales y por ende, la protección de los ecosistemas y los beneficios que estos generan a la sociedad (DAFP, 2012).

Para la definición de los indicadores debe estar claro su objetivo (la finalidad de la medición), la definición (la relación de parámetros o escalas de evaluación e interpretación), quien o quienes son los responsables del monitoreo, la periodicidad de la evaluación, el nivel de referencia (o escala de aplicación) y los puntos de lectura (o las fuentes de información primaria o secundaria) de la información (DAFP, 2012).

Es necesario considerar que la definición del conjunto de indicadores que se presenta en este documento, partió de la revisión de la revisión de los TdR, los cuales fueron complementados con libros, manuales y guías técnicas, etc. relacionados con la evaluación de impacto ambiental en Colombia, con el propósito de sintetizar las línea base, brindar insumos técnicos para evaluar y hacer seguimiento a las *categorías estandarizadas de impactos ambientales*, y a los *impactos ambientales específicos*; y determinar, cuando sea posible, la eficacia de las medidas de manejo al establecer las tendencia del medio.

A continuación se presentan los indicadores seleccionados, manteniendo el modelo de clasificación del ambiente presentado al inicio de este documento.

INDICADORES AMBIENTALES

MEDIO ABIÓTICO

Componente geológico

1. Designación de la calidad de la roca (RQD)

Objetivo: Las rocas, como materiales naturales, tienen discontinuidades como juntas, fisuras, pliegues, cortes y fallas que influyen en la calidad de la estructura rocosa. Estas características inciden en que, por lo general, la calidad de la roca natural está determinada por sus defectos más que por la fuerza del material intacto (Zhang, 2016). Este índice permite estimar el grado de fracturación de un macizo rocoso, a partir de la medición del grado de recuperación de fragmentos de testigos mayores a 10 cm, extraídos en una muestra *core* que no ostenten fisuras⁴. Por lo tanto, es necesario cuidar las muestras para que el manejo de estas no influya en los resultados. Una medida recomendada para las muestras es de al menos 54.7 mm de diámetro, generadas a partir de un cilindro de doble tubo con broca de diamante (recomendaciones de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas - ISRM) (Deere & Deere, 1988; Pereda & Velarde, 2019; Zhang, 2016).

Definición:

$$RQD = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{L_T} * 100$$

Donde:

RQD : Designación de calidad de la roca

L_i : Longitud del fragmento de roca. Cuando hay una sección cuyos fragmentos no superan una longitud de 10 cm o no se puede recuperar en la muestra dentro del cilindro de perforación, L asume el valor de 0.

L_T : Longitud total de la muestra.

Luego de realizar la medición y cálculo del índice, la interpretación de la calidad de la roca se realiza de acuerdo con la Tabla 5.

Tabla 5. Interpretación de la designación de la calidad de la roca

Rango del índice RQD	Calidad de la roca
< 25%	Muy mala
25 – 50%	Mala
50 – 75%	Regular
75 – 90%	Buena
90 – 100%	Muy buena

⁴ Cuando éstas son causadas por el método no deben contarse como tal.

Fuente: Pereda & Velarde (2019)

La anterior es una de las primeras formas de realizar la medición, siendo ilustrada en la Figura 6.

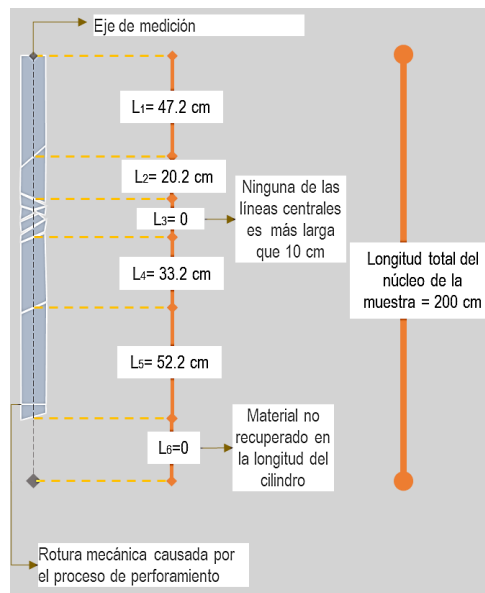


Figura 6. Procedimiento de medición de la designación de la calidad de la roca

Fuente: elaboración propia a partir de Deere & Deere (1988).

Responsabilidad: Las actividades que implique la instalación de infraestructura o la remoción de materiales, que puedan incrementar las condiciones de riesgo y el aumento de la probabilidad de impactos en una región determinada, por remoción en masa u otros fenómenos geológicos asociados a la calidad de la roca.

Recursos: Equipos y profesionales geólogos para la recolección e interpretación de muestras (Zhang, 2016).

Periodicidad: Esta medición debe realizarse desde un valor de referencia (o línea base) de la calidad de la roca a partir de caracterizaciones generales y georreferenciadas. La medición debe ser enriquecida con análisis *in-situ* para determinar la pertinencia de introducción de una actividad. En los casos en que la calidad de la roca (entre otros factores) permita la realización de la actividad, se deben realizar mediciones en el área de influencia, sobre todo cuando la naturaleza de la actividad pueda deteriorar las condiciones de la roca. Ejemplo de esto son las vías (por la generación de vibración), vías férreas, minería, entre otras.

Nivel de referencia: Áreas de influencia de proyectos que intervengan el subsuelo.

Puntos de lectura: Mediciones en unidades geológicas.

2. Clasificación de la masa de la roca – Clasificación de Bieniawski (RMR)

Objetivo: La clasificación de Bieniawski es un sistema que permite determinar las características de unidades geológicas definidas a partir de seis parámetros: (1) resistencia de la roca intacta; (2) designación de la calidad de la roca (RQD); (3) espaciado de las juntas o las discontinuidades; (4) condiciones de las juntas; (5) condición del agua subterránea; y (6) la orientación de las discontinuidades con respecto a la estructura de excavación. La clasificación valora las rocas de 1 a 100 (Pereda & Velarde, 2019; Singh & Goel, 2012).

Definición:

$$RMR = \sum_{j=1}^6 P_j$$

Donde:

RMR: Clasificación de la masa de la roca – Rock mass classification.

P_j : Valor del parámetro tipo j de la clasificación *RMR*

La definición del valor de cada uno de los parámetros se realiza de acuerdo con la evaluación de las diferentes zonas geológicas de acuerdo con los parámetros y su interpretación. De la Tabla 6 a la Tabla 10 se presenta la descripción y clasificación los primeros cinco parámetros, y de la Tabla 11 a la Tabla 13 se encuentran las condiciones de corrección para la orientación de las juntas.

Tabla 6. Interpretación del parámetro de resistencia de la roca intacta

Descripción	Fuerza de compresión (MPa)	Resistencia de carga puntual (MPa)	Valor
Extremadamente fuerte	>250	8	15
Muy fuerte	100 – 250	4 – 8	12
Fuerte	50 – 100	2 – 4	7
Moderadamente fuerte	25 – 50	1 - 2	4
Débil	5 – 25	Para estos valores es preferible la resistencia a la compresión simple	2
Muy débil	1 – 5		1
Extremadamente débil	<1		0

Fuente: Singh & Goel (2012)

Tabla 7. Interpretación del parámetro de designación de la calidad de la roca (RQD)

Descripción	Rango del índice RQD	Valor
Muy mala	<25%	3
Mala	25 – 50%	8
Regular	50 – 75%	10
Buena	75 – 90%	15
Muy buena	90 – 100%	20

Fuente: Singh & Goel (2012)

Para ver el detalle del calculo de este parametro consulte la página 27 de este documento.

Tabla 8. Interpretación del parámetro de espacio de las juntas o discontinuidades

Descripción	Distanciamiento de discontinuidades (m)	Valor
Muy amplia	<2	20
Amplia	0.6 – 2	15
Moderada	0.2 – 0.6	10
Cercana	0.06 – 0.2	8
Muy cercana	<0.06	5

Fuente: Singh & Goel (2012)

Tabla 9. Interpretación del parámetro de condición de juntas

Descripción	Separación de juntas (mm)	Valor
Muy áspero y sin degradación, pared de roca apretada y discontinua, sin separación	0	30
Áspero y ligeramente degradado, separación de la superficie de la roca de la pared <1 mm	<1	25
Ligeramente áspera y moderada a muy degradada, separación de la superficie de la roca de la pared <1 mm	<1	20
Superficie de la roca de la pared de corte lateral o faya con discontinuidad continua de 1–5 mm de ancho	1-5	10
Discontinuidad continua de 5 mm de ancho	>5	0

Fuente: Singh & Goel (2012)

Tabla 10. Interpretación del parámetro de condición del agua subterránea

Descripción	Afluencia en cada 10 m de longitud de túnel (L/m)	Relación entre la presión conjunta del agua y el estrés principal	Valor
Completamente seco	Ninguna	0	15
Evidencia de humedad	<10	0 – 0.1	10
Muy húmedo	10-25	0.1 – 0.2	7
Con goteo	25-125	0.2 – 0.5	4
Flujo de agua	>125	> 0.5	0

Fuente: Singh & Goel (2012)

En lo que respecta a la orientación de las juntas, su valor depende del tipo de POA que se realiza. En la Tabla 11 y la Tabla 12 se encuentra la evaluación sobre túneles, represas. Para taludes se recomienda usar el índice de Calificación de la masa del talud (Slope Mass Rating – SMR). A partir de esta caracterización, se realiza una corrección al índice RMR (la corrección por orientación) de acuerdo con la Tabla 13.

Tabla 11. Evaluación del efecto de orientación de las juntas en túneles

Características de la aproximación		Dirección de buzamiento	Clasificación
Rumbo perpendicular al eje del túnel	Avance con el buzamiento	45° - 90°	Muy favorable
		20° - 45°	Favorable
	Avance contra el buzamiento	45° - 90°	Regular
		20° - 45°	Desfavorable
Rumbo paralelo al eje del túnel		20° - 45°	Regular
		45° - 90°	Muy desfavorable
Independientemente de la falla		0° - 20°	Regular

Fuente: Singh & Goel (2012)

Tabla 12. Evaluación del efecto de orientación conjunta sobre la estabilidad de la fundación de una presa (aplica a cimentaciones)

Dirección de buzamiento	Clasificación
0° - 10°	Muy favorable
10° - 30° (Río arriba)	Desfavorable
10° - 30° (Río abajo)	Regular

Dirección de buzamiento	Clasificación
30° - 60°	Favorable
60° - 90°	Muy desfavorable

Fuente: Singh & Goel (2012)

Tabla 13. Corrección por la orientación de las discontinuidades

Evaluación de la orientación de las juntas para	Túneles	Cimentaciones	Taludes
Muy favorables	0	0	0
Favorables	-2	-2	-5
Medias	-5	-7	-25
Desfavorables	-10	-15	-50
Muy desfavorables	-12	-25	-60

Fuente: Singh & Goel (2012)

Luego de la caracterización de cada uno de los parámetros y el cálculo del índice RMR, su interpretación se realiza de acuerdo con la *Tabla 14*.

Tabla 14. Interpretación del índice RMR en relación con la calidad de macizos rocosos

Clase	I	II	III	IV	V
Valor RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20
Tiempo medio de pie	20 años para 15 m de luz	1 año para 10 m de luz	1 semana para 5 m de luz	10 horas para 2.5 m de luz	30 minutos para 1 m de luz
Cohesión de la masa rocosa MPa	> 0.4	0.3 - 0.4	0.2 - 0.3	- 0.2	<0.1
Ángulo fricción interna de la masa rocosa	>45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	<15°
Presión de rodamiento admisible (T / m ²)	600 - 440	440 - 280	280 - 135	135 - 45	45 - 30
Pendiente de corte seguro	>70°	65°	55°	45°	<40°
Clasificación de la masa rocosa	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala

Fuente: Singh & Goel (2012)

Responsabilidad: Actividades de construcción de infraestructura y que por lo tanto puedan afectar (y generar condiciones de riesgo) o ser afectadas por las condiciones del macizo rocoso.

Recursos: Mapas topográficos, fotografías aéreas, modelos de elevación digital, SIG, equipo de profesionales expertos en geología.

Periodicidad: Esta medición debe partir de un valor de referencia de las unidades geológicas potencialmente afectadas por la introducción de infraestructura. Cuando las obras son efectivamente realizadas debe haber monitoreo posterior a la ejecución que permita actualizar las condiciones del macizo rocoso. Además, debe planearse un monitoreo cuando por la naturaleza de las actividades se pueda generar modificaciones al macizo rocoso (como aquellas que tienen vibraciones o afectan continuamente a la roca como las perforaciones).

Nivel de referencia Unidades geológicas con potencial de ser sometidas a la realización de proyectos de infraestructura.

Puntos de lectura: Unidades geológicas para trabajo en campo e imágenes e información remota.

3. Potencial de generación de ácido en minas

Objetivo: Las aguas que provienen de las minas y que se caracterizan por tener un pH bajo y altas concentraciones de metales con potencial de solubilización son denominadas drenajes ácidos. Estos se generan por la oxidación de sulfuros minerales como pirita, pirrotita, marcasita, entre otros, en el contacto con aire y agua en un proceso de meteorización. Para que se generen los drenajes ácidos deben haber suficientes cantidades de agua, oxígeno, junto con la acción catalizadora de bacterias (Aduvire, 2006).

El potencial de generación de drenajes ácidos es la máxima cantidad de ácido sulfúrico que puede ser producido por la oxidación de minerales de sulfuro en las rocas. Por lo tanto, el sulfuro total es el valor más usado para la medición del potencia de generación de ácido en minas (Hamdani et al., 2019; Skousen et al., 2002).

Definición

$$PGA = wt\%_{St} \times 30.6$$

Donde:

PGA: Potencial de generación de ácido en minas

wt%_{St}: Fracción de masa de sulfuros en relación con el total de masa de la muestra

Responsabilidad: Actividades de minería o que durante su ejecución puedan generar drenajes ácidos

Recursos: Equipos de análisis geoquímicos

Periodicidad: Antes de la ejecución de la actividad como referente del potencial de generación de ácido de la roca en donde se realiza la actividad con seguimientos anuales.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Mediciones en campo y análisis en laboratorio

4. Potencial de lixiviación

Objetivo: Este índice permite estimar el potencial de contaminación del agua subterránea con sustancias que puedan infiltrarse en el suelo. Para la estimación puede utilizarse un factor de atenuación (FA) que permite determinar la fracción de la sustancia contaminante que se lixivia a través del suelo; y un factor de retardo que determina la movilidad de las sustancias contaminantes en este (Bedmar et al., 2013; Gianelli & Bedmar, 2017).

Definición:

$$AF = e^{\left[\frac{-(0.693 \times d \times \theta_{cc} \times RF)}{(q \times T_{\frac{1}{2}})} \right]}$$
$$RF = 1 + \frac{\rho \times foc \times Koc}{\theta_{cc}}$$

Donde:

AF :	Factor de atenuación
d (cm):	Profundidad del horizonte del suelo analizado
θ_{cc} (m ³ /m ³):	Contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo
q (cm/día):	Recarga neta del agua subterránea
$T_{1/2}$ (Días):	Vida media de las sustancias contaminantes en el suelo
RF :	Factor de retardo
ρ (Mg m ⁻³):	Densidad aparente del suelo
f_{oc} (%):	Fracción de carbono orgánico
K_{oc} (L kg ⁻¹):	Coefficiente de partición en carbono orgánico

Cuando puedan darse valores muy pequeños del factor de atenuación o se generen elevados desvíos, se utiliza una transformación de indicador así:

$$AFT = \frac{\ln(AF)}{-0.693}$$

Donde:

AFT : Factor de atenuación transformado.

La interpretación del resultado de estos indicadores en función del potencial de lixiviación se realiza de acuerdo con la Tabla 15.

Tabla 15. Interpretación de AF , RF y AFT en relación con el potencial de lixiviación

RF	Clasificación	AF	AFT	Clasificación
1	Muy móvil	$\geq 2,5 \times 10^{-1}$ y ≤ 1	≤ 2	Muy probable
>1 y <2	Móvil	$\geq 1 \times 10^{-1}$ y $< 2,5 \times 10^{-1}$	≥ 2 y < 3.3	Probable
≥ 2 y <3	Moderadamente móvil	$\geq 1 \times 10^{-2}$ y $< 1 \times 10^{-1}$	≥ 3.3 y < 7.2	Moderadamente probable
≥ 3 y <10	Moderadamente inmóvil	$\geq 1 \times 10^{-4}$ y $< 1 \times 10^{-2}$	≥ 7.2 y < 13.3	Improbable
10	Muy inmóvil	$< 1 \times 10^{-4}$	> 13.3	Muy improbable

Fuente: Bedmar et al. (2013)

Responsabilidad: Actividades que generen sustancias contaminantes que puedan infiltrarse en el suelo y eventualmente llegar a aguas subterráneas.

Recursos: Equipos para análisis de suelos y para evaluación en laboratorio.

Periodicidad: Antes de iniciar la actividad para establecer una medición de referencia en relación con las sustancias que utilice o genere la actividad y durante la ejecución del POA un seguimiento anual.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Mediciones en campo y análisis en laboratorio.

Componente geomorfológico

Los índices geomorfológicos se usan para identificar y monitorear los cambios en las formas de la tierra bien sea por factores naturales como la tectónica o la erosión (aquella no provocada por actividades humanas) o factores antrópicos con la capacidad para incidir en las geoformas y provocar procesos erosivos. Dentro de las

características que definen a las geoformas se encuentran la topografía, el drenaje, la textura (asociada a las coberturas o usos del suelo) y el tono (Duque, 2017; Molano & Torres, 2018).

Muchos de los fenómenos descritos dentro de la morfología pueden ser usados como medidas de planeación, en tanto pueden evidenciar factores de inestabilidad del terreno, movimientos en masa y otros procesos que puedan ser acentuar condiciones de vulnerabilidad en la implementación de determinadas actividades (C. E. Escobar & Duque, 2016). A continuación se presentan algunos índices que permiten la cuantificación de estos efectos.

5. Índice de sinuosidad del frente de la montaña

Objetivo: Este índice describe la transición topográfica entre las montañas y el terreno llano y permite, entre otros aspectos, evaluar la coincidencia o no de la montaña con una zona tectónica activa por acción de una falla. Asimismo, pueden evidenciarse los efectos de la erosión (natural o de origen antrópico) debido a la sinuosidad de la unión entre el frente de la montaña, que se diferencia de las uniones lineales generadas por la cercanía a zonas tectónicas (Molano & Torres, 2018).

Definición:

$$Smf = \frac{Lmf}{LS}$$

Donde:

Smf: Índice de sinuosidad del frente de la montaña.

Lmf: Longitud planimétrica total a lo largo del frente de la montaña.

LS: Longitud de línea recta en frente de la montaña.

En general, si la actividad tectónica es alta, predominan frentes de montaña rectos; mientras que si las tasas de crecimiento son lentas, las fuerzas erosivas empiezan a prevalecer e insinúan una mayor sinuosidad en el área (Servicio Geológico Colombiano, 2018). La interpretación de la actividad tectónica de las montañas en relación con su sinuosidad se puede categorizar según la Tabla 16.

Tabla 16. Interpretación y categorización del Índice de sinuosidad frente de la montaña

Rango del índice	Características de la actividad de las montañas	Formaciones asociadas
1.0 – 1.5	Sinuosidad de montañas con alta actividad tectónica	Abanicos aluviales atrincherados Cuencas de drenaje elongadas Valles de piso estrecho Vertientes empinadas
1.5 – 3.0	Sinuosidad de montañas con mediana actividad tectónica	Abanicos aluviales atrincherados Grandes cuencas de drenaje Vertientes empinadas Valles de pisos amplios
3.0 – 10.0 o mayor	Montañas inactivas	Frentes montañosos con bahía Vertientes empinadas solo en estratos recientes Bajo desarrollo de sistemas de drenaje

Fuente: elaboración propia a partir de Ziyad (2014) y Servicio Geológico Colombiano (2018).

Usualmente, los sistemas montañosos con un S_{mf} superior a 3 tiene frentes embebidos, donde la erosión ha tenido una influencia significativa en el borde de la montaña llegado a sinuosidades de hasta 1 km o más (Keller & Pinter, 2002; Ziyad, 2014).

Responsabilidad: Los POA que puedan generar condiciones de riesgo por cuando se encuentra con actividad tectónica o alta erosión, o que puedan aumentarla.

Recursos: Mapas topográficos, fotografías aéreas, modelos de elevación digital, SIG.

Periodicidad: Esta medición debe realizarse desde un valor de referencia (o línea base de la forma del borde de la montaña) y debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades o eventos con modificar el borde (y, por lo tanto, generar condiciones de riesgo).

Nivel de referencia: Regiones asociadas a piedemonte.

Puntos de lectura: Estaciones de monitoreo, registros administrativos, mediciones directas.

6. Índice de asimetría de la cuenca de drenaje

Objetivo: Permite verificar la relación de asimetría de la cuenca en relación con uno de sus lados. Es utilizado para detectar basculamientos⁵ sobre las cuencas de drenaje de áreas extensas. Las asimetrías pueden representar condiciones de inestabilidad del terreno con riesgo de fenómenos de remoción en masa, como condición de vulnerabilidad a tener en cuenta en la implementación de proyecto (Molano & Torres, 2018).

Definición:

$$AF = 100 \times \frac{Ar}{At}$$

Donde:

AF : Factor de asimetría.

Ar : Área de la cuenca hacia la derecha del río aguas abajo.

At : Área total de la cuenca.

La interpretación del factor de asimetría de la cuenca se basa en la Tabla 17.

Tabla 17. Interpretación del factor de asimetría de la cuenca

Rango factor de asimetría	Características
50	Cuenca simétrica
$AF < 50$ o $AF > 50$	Basculamiento de la cuenca

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2018)

⁵ Los basculamientos son fenómenos en los que uno de los lados de la cuenca sufre elevación, mientras que el otro tiende al hundimiento (Iriondo, 2009).

Responsabilidad: Las entidades gubernamentales que requieren tener un registro de la condición de las cuencas como medida *a priori* de vulnerabilidad territorial. Por su parte, las actividades que puedan ser afectadas o que puedan incrementar condiciones de riesgo por movimientos en masa o por exacerbación del basculamiento de cuencas deben considerar este índice en sus procesos de planeación y presentación de estudios.

Recursos: Mapas topográficos, fotografías aéreas, modelos de elevación digital, SIG,

Periodicidad: Esta medición debe partir de un valor de referencia de las cuencas potencialmente afectadas por la introducción de infraestructura en la cuenca o en el área vulnerable al deslizamiento por causa del basculamiento.

Nivel de referencia: Cuenca o subcuenca hidrográfica

Puntos de lectura: Información cartográfica y remota.

7. Variaciones del perfil de playa: erosión y acreción costera

Objetivo: La erosión costera corresponde a la pérdida de terreno de las playas por la acción del mar, en donde el aporte de sedimento de los ríos no alcanza a contrarrestar la remoción. En general, los procesos de sedimentación que alimentan a las playas se han visto mermados en los últimos años por causa de la regulación de los cursos fluviales que ha mermado los aportes naturales a las playas. Esto ha generado que las playas tengan un balance sedimentario negativo o neutro en el mejor de los casos (Navarrete-Ramirez, 2014).

La acreción costera, por su parte, sucede por la acumulación de sedimento y la consolidación de terrenos por encima de las mareas generándose espigas en los extremos de las islas e incluso como nuevas porciones de tierra. Estos procesos pueden suceder en costas bajas y pueden propiciar el crecimiento de playas y otras formas de acumulación costera (Navarrete-Ramirez, 2014).

Para hacer seguimiento a estos procesos, la medición del perfil de la playa permite identificar cambios en la morfología a causa de la erosión o acreción costera. Esta medida incluye la pendiente de la playa y su anchura (Navarrete-Ramirez, 2014). La medición, en ese caso toma como referencia mediciones del ancho de playa desde puntos de referencia específicos y/o a través de imágenes remotas que permitan las mediciones correspondientes.

Definición:

$$\Delta Ap = \frac{Ap_t - Ap_{t-1}}{Ap_{t-1}}$$

Donde:

Ap = Ancho de la playa

Responsabilidad: Actividades que puedan afectar la cantidad de material sedimentario en las playas bien sea por acción directa (como en la extracción de materiales o el retiro de manglares) o indirecta por incidencia en los afluentes que aportan sedimentos a las costas.

Recursos: Equipos para medición del perfil en campo y sistemas de georreferenciación para análisis en SIG, así como imágenes remotas.

Periodicidad: Cada tres meses como seguimiento periódico, pero cuando sucedan eventos extremos debe realizarse lo más pronto para conocer la respuesta de las playas a estos fenómenos y cómo se da su recuperación (Navarrete-Ramirez, 2014).

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad. Si esta tiene influencia en la regulación de los cursos fluviales que alimentan de sedimento a las playas, el análisis debe realizarse en las que serán potencialmente afectadas.

Puntos de lectura: Mediciones en campo y análisis en SIG

Componente edáfico

8. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Objetivo: La capacidad de intercambio catiónico (CIC) permite determinar la fertilidad de los suelos por su capacidad de almacenar nutrientes (cationes o iones de carga positiva) para evitar que se pierdan en los estratos geológicos, o que sean arrastrados por la acción del agua, entre otros fenómenos. Es, en este sentido, una medida de la cantidad de sitios de carga negativa en el suelo, que pueden retener cationes como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) por fuerzas electrostáticas. Se expresa como el número de moles de iones con carga positiva absorbidos en una unidad de masa de suelo seco y es medido en $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ o $\text{meq}/100\text{g}$ (Garrido Valero, 1993; Guevara, 2017).

Definición:

$$CIC = \frac{NM(+)}{MSS}$$

Donde:

CIC: Capacidad de intercambio catiónico

NM(+): Número de moles de iones con carga positiva absorbida por la muestra

MSS: Masa de suelo seco de la muestra

En los procesos de intercambio catiónico intervienen las partículas coloides del suelo (o materia orgánica), los hidróxidos y los minerales arcillosos. En la Tabla 18 se muestran diferentes niveles de CIC para varios coloides.

Tabla 18. Niveles de CIC para diferentes coloides

Coloide	CIC (meq/100g de suelo)
Humus	100-300
Vermiculita (2:1)	80-150
Monmorillonita	60-100
Illita (2:1)	25 -40
Caolinita (1:1)	3-15
Sesquióxidos	3-9

Fuente: Guevara (2017)

La interpretación de la capacidad de intercambio catiónico se realiza de acuerdo con la Tabla 19.

Tabla 19. Interpretación de los niveles de intercambio catiónico

CIC Total (Meq/100g)	Características	Nivel de CIC
0-10	Suelo muy pobre con necesidad de aporte de materia orgánica	Muy bajo
10-20	Suelo pobre con necesidad de aporte de materia orgánica	Bajo
20-35	Suelo medio	Medio
35-45	Suelo rico	Medio alto
>45	Suelo muy rico	Alto

Fuente: Garrido Valero (1993)

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en los niveles de fertilidad del suelo ya sea por su manejo, retiro de coberturas asociada, generación de erosión, entre otros.

Recursos: Equipo de ingenieros agrónomos o edafólogos o personal técnico capacitado para la realización de toma de muestras y análisis de suelos, en laboratorios.

Periodicidad: Debe partirse de una medida de referencia sobre la que determinar posteriormente el cambio en los niveles de intercambio catiónico, con una frecuencia anual.

Nivel de referencia: Área de influencia.

Puntos de lectura: Muestreos en campo.

9. Porcentaje de saturación de bases

Objetivo: Este índice representa la fracción de cationes básicos (calcio, magnesio, potasio y sodio) en relación con el total de cationes del suelo (que también incluye cationes ácidos como hidrógeno y aluminio). Para su cálculo se parte del resultado del índice de capacidad de intercambio catiónico y se expresa en forma de porcentaje. Un pH de 7 (neutral) indica que la saturación de las bases llegan al 100% (FAO, n.d.; Garrido Valero, 1993).

Definición:

$$V\% = \frac{(Ca + Mg + Na + K)}{CIC} \times 100$$

Donde:

$V\%$: Porcentaje de saturación de bases

Ca, Mg, Na, K : Concentración de cationes básicos

CIC : Capacidad de intercambio catiónico

El porcentaje de saturación de bases puede ser interpretado de acuerdo con la Tabla 20.

Tabla 20. Interpretación de la saturación por bases

Saturación por bases $V\%$	Características
<50%	Suelo muy ácido, poco nutritivo
50% - 90%	Suelo medio, cuya riqueza dependerá del valor de CIC total

Saturación por bases V%	Características
>90%	Suelo saturado de bases, su sedes de intercambio son funcionales y su pH es casi neutro a básico

Fuente: Garrido Valero (1993)

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en los niveles de fertilidad del suelo ya sea por su manejo, retiro de coberturas asociada, erosión, entre otros.

Recursos: Equipo de edafólogos o ingenieros agrónomos para la realización de análisis de suelos.

Periodicidad: Debe partirse de una medida de referencia sobre la que determinar posteriormente el cambio en los niveles de saturación de base, con una frecuencia anual.

Nivel de referencia: Área de influencia.

Puntos de lectura: Mediciones en campo y análisis de laboratorio.

10. Proporción del área de suelos degradados por salinización (PASDS)

Objetivo: La salinización es el proceso de aumento, ganancia y/o acumulación de sales en el suelo por actividades como la agricultura y los agroquímicos usados, la disposición de aguas residuales y vertimientos industriales, entre otras. Genera afectaciones fisicoquímicas y biológicas del suelo, inhibe el proceso natural de crecimiento de las plantas y modifica las condiciones de la biota. El índice de proporción del área degradada por salinización permite identificar la vulnerabilidad de los suelos en determinadas regiones y a partir de ello realizar procesos de planificación. Asimismo, es una herramienta de toma de decisiones sobre actividades con potencial de afectación a los suelos, en este aspecto (Peña & Sánchez, 2018).

Definición:

$$PASDS_{jtk} = \frac{\sum_{i=1}^n ssd_{ikjt}}{ST_{jt}} \times 100$$

Donde:

$PASDS_{jtk}$: Proporción del área total de suelos degradados por salinización en un grado k en una unidad de referencia j⁶ en un tiempo t.

ssd_{ikjt} : Superficie i de suelo degradado en algún grado de salinización k en una unidad de referencia j en el tiempo t.

ST_{jt} : Superficie total de la unidad de referencia j.

n : Número de áreas de suelo afectado por algún grado de salinización k en una unidad de referencia j en un tiempo t.

k : Los grados de salinización son ligera, moderada, severa y muy severa. En este sentido, el resultado del índice indica la proporción del área total que presenta cada uno de estos niveles.

⁶ La superficie de referencia puede ser el país, un área hidrográfica, un departamento, una jurisdicción de corporación autónoma regional, entre otras unidades espaciales de planeación.

Los grados de salinización se pueden medir a través de variables como la conductividad eléctrica (CE), la razón de absorción de sodio (RAS), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), la reacción de sales poco solubles o el contenido de sulfatos. Asimismo, las mediciones de reacción de suelo (pH) y la saturación de bases (SB) son variables indirectas de los procesos de salinización (Peña & Sánchez, 2018). La interpretación del índice puede hacerse según los porcentajes de áreas de degradación de cada variable, como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Interpretación del índice de proporción del área de suelos degradados por salinización

Variables	Rangos	Categoría
PSI, RAS, CE, pH y SO_4	$\text{RAS} \geq 13$ o $\text{PSI} \geq 15$	Muy severo
	$\text{CE} \geq 16$ dS/M	
	$\text{CE} \geq 4$ dS/M y $[\text{SO}_4] \geq 0.05\%$	
CE, PSMg, CaCO_3eq y $\text{CaCO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$8 \text{ dS/M} \leq \text{CE} < 16 \text{ dS/M}$	Severo
	$\text{PSMg} \geq 40$	
	$[\text{CaCO}_3\text{eq}] \geq 10\%$	
	$[\text{CaCO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] \geq 15\%$	
CE, PSMg, CaCO_3eq y $\text{CaCO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$4 \text{ dS/M} \leq \text{CE} < 8 \text{ dS/M}$	Moderado
	$30 \leq \text{PSMg} < 40$	
	$2 \leq [\text{CaCO}_3\text{eq}] < 10\%$	
	$5 \leq [\text{CaCO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] < 15\%$	
CE	$2 \text{ dS/M} \leq \text{CE} < 4 \text{ dS/M}$	Ligero
CE	$\text{CE} < 2 \text{ dS/M}$	Bajo

Fuente: Peña & Sánchez (2018)

Responsabilidad: POA que puedan aportar sustancias al suelo, que generen salinización.

Recursos: Dependiendo de la superficie de referencia, los recursos pueden centrarse en la información y mapas oficiales. Cuando la escala es mayor, se requieren estudios puntuales y cartografía de mayor detalle.

Periodicidad: Esta medición debe realizarse desde un valor de referencia sobre las condiciones de salinidad del suelo y debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades o eventos con la capacidad aportar mayores niveles de salinización.

Nivel de referencia: Superficie de la unidad de referencia definida según la actividad, la incidencia y los requerimientos por parte de autoridades ambientales.

Puntos de lectura: Información oficial o estudios de campo.

11. Proporción del área de suelos degradados por erosión (PASDE)

Objetivo: Este índice evidencia la proporción de áreas degradadas por erosión en un área total de referencia. La erosión se relaciona con la pérdida superficial de la corteza terrestre por la acción del agua (con formación de cárcavas, surcos, surquillos y erosión laminar), y el viento (superficies de deflación, pavimento desértico, crestas y ripples, dunas, médanos y movimientos de arena). Estos procesos son mediados por la acción humana con actividades que desprotegen el suelo o son responsables directas de la pérdida de la capa superficial (R. Sánchez et al., 2017).

Definición:

$$PASDE_{jtk} = \frac{\sum_{i=1}^n ssd_{iljt}}{ST_{jt}} \times 100$$

Donde:

$PASDE_{jtk}$: Proporción del área total de suelos degradados un grado de erosión l en una unidad de referencia j en un tiempo t .

ssd_{iljt} : Superficie i de suelo degradado en algún grado de erosión l en una unidad de referencia j en el tiempo t .

ST_{jt} : Superficie total de la unidad de referencia j .

n : Número de áreas de suelo afectado por algún grado de erosión l en una unidad de referencia j en un tiempo t .

l : Los grados de erosión son: ligera, moderada, severa y muy severa.

Los grados de erosión se definen de acuerdo con la Tabla 22.

Tabla 22. Grados de erosión

Grados de erosión	Descripción	Categoría
1	No hay erosión	Sin evidencia
2	Pérdida < 25% Horizonte A	Erosión ligera
3	Pérdida entre 25% y 75% Horizonte A	Erosión moderada
4	Pérdida > 75% Horizonte A	Erosión severa
5	Pérdida total Horizonte A	Erosión muy severa

Fuente: Sánchez, Mendoza, Otero, & Alvarez (2017)

Responsabilidad: POA que puedan realizar intervenciones que desprotejan el suelo o que sean responsables directas de la pérdida de la capa superficial del suelo, deben considerar las características del suelo a intervenir y los tomadores de decisiones deben adoptar la información dentro de sus procesos.

Recursos: Dependiendo de la superficie de referencia, los recursos pueden encontrarse en la información y mapas oficiales. Cuando la escala es mayor, se requieren estudios puntuales y cartografía de detalle.

Periodicidad: Esta medición debe realizarse desde un valor de referencia en relación con los grados de erosión del suelo y debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades que puedan influir en la pérdida de suelo.

Nivel de referencia: superficie de la unidad de referencia definida según la actividad, la incidencia y los requerimientos por parte de las autoridades ambientales.

Puntos de lectura: Información oficial o estudios de campo.

12. Área de remoción de suelo

Objetivo: La remoción del suelo tiene incidencia en la reducción de los niveles de materia orgánica, la exposición de horizontes más profundos, la disminución del contenido de carbono orgánico de las capas superficiales y, por ende, se generan modificaciones a su fertilidad debido a la baja capacidad de almacenamiento de agua, la disminución de la diversidad de organismos, entre otros fenómenos. La remoción,

por supuesto, puede ser causada por la erosión, pero también causada por diferentes actividades antrópicas (Brunel & Seguel, 2011).

Definición:

$$\%ASR = \frac{ASR}{AT}$$

$\%ASR$: Porcentaje de área con suelo removido

ASR : Área con suelo removido

AT : Área total

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que puedan o deban remover el suelo por sus operaciones

Recursos: Instrumentos para determinar el área removida o imágenes de sensores remotos, y sistemas de información geográfica

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Análisis con información remota y mediciones en campo

Componente geotecnia

13. Factor de seguridad

Objetivo: El factor de seguridad es un referente para establecer la estabilidad del terreno que puede estar sujeto a la ejecución de obras de infraestructura como presas, diques, rellenos y terraplenes, entre otros. Factores asociados a las propiedades geotécnicas e hidrológicas afectan a este índice (C. Escobar & Duque, 2017)

Definición:

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

$$\tau_f = c + \sigma' \times \tan\phi$$

$$\tau_d = C_d + \sigma' \times \tan\phi_d$$

Donde:

FS_s : Factor de seguridad

τ_f : Resistencia cortante promedio del suelo

τ_d : Esfuerzo cortante promedio del suelo

c : Cohesión (kPa)

σ' : Esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de la falla

ϕ : Ángulo de fricción (°)

C_d : Cohesión efectiva (kPa)

ϕ_d : Ángulo de fricción a lo largo de la superficie potencial de la falla (°)

Factores de seguridad iguales a 1.0 denotan falla inminente y valores de 1.4 se asocian con condiciones de diseño de talud más estables. A partir de la Tabla 23 se interpreta los valores obtenidos en la evaluación del factor de seguridad, considerando riesgos para la vida y riesgos económicos en taludes nuevos, y en la Tabla 24 para taludes existentes (en cuyo caso se considera únicamente el riesgo para la vida).

Tabla 23. Factores de seguridad recomendables para taludes nuevos, considerando un periodo de lluvia de diez años.

Riesgo económico	Riesgo para la vida	Factor de Seguridad recomendado contra pérdidas de vidas para una lluvia con periodo de retorno de diez años.		
		Despreciable	Bajo	Alto
Factor de seguridad recomendado contra pérdidas económicas para una lluvia con periodo de retorno de diez años.	Despreciable	>1	1.2	1.4
	Bajo	1.2	1.2	1.4
	Alto	1.4	1.4	1.4

Fuente: Escobar & Duque (2017)

Tabla 24. Factores de seguridad recomendables para taludes existentes, para el diseño de obras remediales y preventivas, considerando un periodo de lluvias de 10 años.

Factor de Seguridad recomendado contra pérdidas de vidas para una lluvia con periodo de retorno de diez años.			
	Despreciable	Bajo	Alto
Riesgo para la vida	1.0	1.1	1.2

Fuente: Escobar & Duque (2017)

Responsabilidad: Actividades que requieran de la construcción o modificación de un talud artificial para la implementación de diferentes proyectos de infraestructura.

Recursos: Equipo de geólogos o ingenieros civiles para realizar la medición.

Periodicidad: Antes de iniciar el proyecto o actividad para determinar la pertinencia de su ejecución. Luego de esta verificación inicial, debe hacerse un monitoreo periódico anual del talud que permita tener un margen de acción para acciones preventivas y correctivas.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Zona de construcción del talud

14. Capacidad Portante

Objetivo: Este índice expresa la máxima capacidad un terreno para soportar cargas estructurales sin que se generen riesgos de daño en las cimentaciones, teniendo en cuenta el factor de seguridad. La carga no depende solamente de las condiciones del terreno, sino también de la cimentación, las características de la estructura y un coeficiente de seguridad (Archenti Zegarra, 2018; Nij Patzán, 2009).

Definición:

$$q_u = cN_c + \gamma_1 D_f N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

$$N_c = \cot\phi(N_q - 1)$$

$$N_q = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4-\frac{\phi}{2}}\right)tg\phi}}{2\cos^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)}$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2}\left(\frac{K_{p\gamma}}{2\cos^2\phi} - 1\right)tg\phi$$

Donde:

- q_u : Capacidad de carga última (kg/cm²)
- c : Cohesión del suelo (kg/m²)
- N_c, N_q, N_γ : Factores de corrección por capacidad de carga
- ϕ : Ángulo de fricción
- D_f : Profundidad de la cimentación
- γ_1 : Peso unitario del peso externo del suelo (kg/m³)
- γ : Peso unitario del suelo bajo el cimiento (kg/m³)
- B : Ancho de la cimentación
- $K_{p\gamma}$: Coeficiente de empuje pasivo de la tierra

La ecuación de q_u corresponde al modelo general de Terzagui (1943), sin embargo, esta se modifica de acuerdo con las características de la cimentación, nivel freático, entre otras. Asimismo, otros modelos de cálculo de la capacidad portante son Brich-Hansen, Taylor (1948), Jiménez Salas (1954), Meyerhof (1953) (Archenti Zegarra, 2018).

Responsabilidad: Actividades que impliquen construcción de infraestructura y cimentación.

Recursos: Equipo de geólogos y/o ingenieros civiles para la realización de las mediciones, experimentos y análisis.

Periodicidad: Antes de empezar el proyecto para definir las condiciones de diseño o si efectivamente el suelo puede soportar las cargas previstas o proyectadas.

Nivel de referencia: Área de intervención y/o de influencia del proyecto.

Puntos de lectura: Mediciones en campo y cartográficas de alta precisión.

15. Factor de estabilidad

Objetivo: El factor de estabilidad es un valor numérico análogo a la capacidad portante que permite establecer las condiciones de estabilidad de un talud para la implementación de proyectos de infraestructura (Siad & Megueddem, 1998; Terzaghi, 1943).

Definición:

$$N_s = \frac{H_c \times \gamma}{c}$$

Donde:

- N_s : Factor de estabilidad
- H_c : Altura crítica del talud (m)
- γ : Peso unitario sumergido en el suelo (kg/m^3)
- c : Cohesión del suelo (kg/m^2)

Responsabilidad: Actividades que impliquen construcción de infraestructura y cimentación en taludes.

Recursos: Equipo de geólogos y/o ingenieros civiles para la realización de las mediciones, experimentos y análisis.

Periodicidad: Antes de empezar el proyecto para definir las condiciones de diseño o si efectivamente el suelo puede soportar determinadas cargas.

Nivel de referencia: Zona de proyecto

Puntos de lectura: Mediciones en campo y cartográficas de alta precisión

16. Potencial de colapso (PC)

Objetivo: El colapso sucede en suelos porosos no saturados y con estructura meta-estable (las partículas que forman la estructura establecen vínculos a partir de agentes cementantes que generan resistencia temporal) y cuyo detonante es el aumento de la saturación y/o las tensiones que soporta, generándose cambios repentinos en el volumen y pérdida de resistencia al corte (Valencia González et al., 2015)

Definición:

$$PC = \frac{\Delta e_c}{\left[1 + \left(\frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) \times e_{o(medio)} \right]}$$

$$\Delta e_c = \left[\left(\frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) - \left(\frac{e_{sat}}{e_{o(sat)}} \right) \right] \times e_{o(medio)}$$

$$e_{o(medio)} = \frac{(e_{o(nat)} + e_{o(sat)})}{2}$$

Donde:

PC :	Potencial de colapso (%)
$e_{0(nat)}$:	Relación de vacío inicial de la muestra en estado de humedad natural
$e_{0(sat)}$:	Relación de vacío inicial de la muestra en estado saturado
e_{nat} :	Relación de vacío final de la muestra en estado de humedad natural
e_{sat} :	Relación de vacío final de la muestra en estado saturado
$e_{0(medio)}$:	Relación de vacío inicial media de la muestra

La interpretación del índice se realiza de acuerdo con la Tabla 25.

Tabla 25. Interpretación del potencial de colapso (PC)

PC (%)	Gravedad del potencial de colapso
0-1	Ninguna
1-5	Moderada
5-10	Problemática
10-20	Grave
>20	Muy grave

Fuente: Valencia González et al.(2015)

Responsabilidad: Actividades que requieran la construcción de infraestructura o cuya operación pueda modificar las condiciones iniciales del suelo incrementando el potencial de colapso.

Recursos: Equipos de medición de condiciones físicas del suelo y la roca

Periodicidad: Antes de iniciar la actividad con seguimiento anual

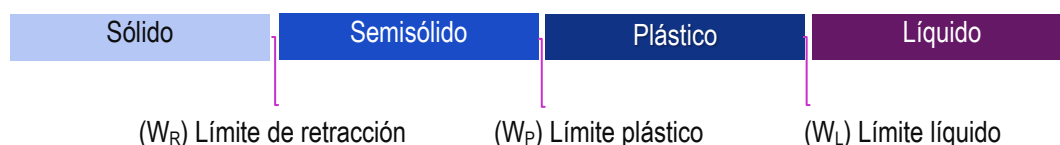
Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Toma de muestras en campo y análisis de laboratorio

17. Consistencia y plasticidad del suelo

Objetivo: La evaluación de la consistencia permite establecer las condiciones de suelos finos que a partir de sus características mineralógicas y contenido de humedad fluyen sin romperse. Los límites de Atterberg permiten determinar la consistencia o la plasticidad (capacidad de aceptar deformaciones sin romperse) del suelo fino, dependiendo de su naturaleza, a partir de la estimación de la cantidad de agua que en él se encuentre para pasar de un estado a otro (Figura 7).

Figura 7. Límites de Atterberg



En este sentido, el suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso. Los límites de Atterberg permiten identificar los puntos de humedad para cambiar de estado (Duque Escobar & Escobar Potes, 2016; Puy Santín, 2005; G. P. Sánchez & Sumba, 2019).

De acuerdo con Duque Escobar & Escobar Potes (2016), los diferentes estados del suelo se definen así:

- Punto líquido: el suelo se deforma por su propio peso y la resistencia al corte es casi nula.
- Punto plástico: al perder humedad el suelo pierde fluidez, pero aún se deforma sin agrietarse.
- Punto semisólido: con menos humedad, al intentar deformarlo se desmorona.
- Punto sólido: cuando el suelo se seca a tal punto que su volumen ya no cambia por la pérdida progresiva de agua.

El índice de consistencia es una medida de la facilidad de un suelo para ser deformado y es expresa como una relación entre (1) la diferencia del límite líquido y el contenido de agua del suelo, y (2) la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (o índice de plasticidad).

Definición:

$$I_P = W_L - W_P$$

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_P} \times 100$$

Donde:

- I_c : Índice de consistencia
 I_P : Índice de plasticidad
 W : Humedad del suelo (%)
 W_L : Límite líquido, proporción del peso del agua contenida en el suelo en relación con su peso en seco en el cambio de líquido a plástico (%)
 W_P : Límite plástico, proporción del peso del agua contenida en el suelo en relación con su peso en seco en el cambio de plástico a semisólido (%)

Para interpretar los resultados del índice de plasticidad se basa en la Tabla 26 y el índice de consistencia a partir de la Tabla 27.

Tabla 26. Tipo de suelo por rangos de valores del índice de plasticidad

Tipo de suelo	Rangos del índice de plasticidad (IP)
Suelos desmenuzables	$IP < 1$
Suelos débilmente plásticos	$1 \leq IP < 7$
Suelos medianamente plásticos	$7 \leq IP < 15$
Suelos altamente plásticos	$IP \geq 15$

Fuente: Sánchez & Sumba (2019)

Tabla 27. Consistencia del suelo

Consistencia del suelo	Rangos del índice de consistencia (IC)
Media dura, sólida	$IC > 1$
Plástica	$0.75 \leq IC < 1$
Suave	$0.50 \leq IC < 0.75$
Viscosa	$0 \leq IC < 0.50$
Líquida	$IC \leq 0$

Fuente: Sánchez & Sumba (2019)

Responsabilidad: Actividades sean o requieran construcción de infraestructura y obras civiles, o que puedan modificar las condiciones del suelo.

Recursos: Equipo profesional de agrólogos, ingenieros agrónomos, geólogos y/o ingenieros civiles, para la realización de los análisis.

Periodicidad: Antes de iniciar el proceso de diseño de una obra y posterior a la realización del proyecto, para determinar los cambios en los parámetros de consistencia y plasticidad y de esa manera determinar el impacto. En las actividades que por cuya naturaleza se modifican las condiciones del suelo.

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad.

Puntos de lectura: Levantamientos de muestras en campo y análisis en laboratorio.

Componente hidrológico

18. Índice del uso del agua

Objetivo: el Índice de Uso del Agua (IUA) permite relacionar la oferta hídrica de una subzona hidrográfica con la demanda de los diferentes actores que hacen uso de las fuentes hídricas en un territorio. Al ser un índice agregado de las presiones sectoriales es estratégico en relación con la planeación territorial, en particular en lo relacionado con el manejo de las cuencas (Saldarriaga & Carrillo, 2012).

Definición:

$$IUA = \frac{DH}{OH} \times 100$$

Donde:

IUA: Índice de uso de agua en una subzona hidrográfica.

DH: Demanda agregada de los sectores presentes en determinada subcuenca hidrográfica.

OH: Oferta hídrica disponible en determinada subzona hidrográfica.

Según Saldarriaga & Carrillo (2012) la interpretación del índice se realiza según la escala que se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28. Interpretación y categorización del IUA

Rango del índice	Categoría	Características
>100	Crítico	La presión supera la oferta hídrica superficial disponible
50.01 – 100	Muy Alto	La presión es muy alta con respecto a la oferta hídrica superficial disponible
20.01 – 50	Alto	La presión es alta con respecto a la oferta hídrica superficial disponible
10.01 - 20	Moderado	La presión es moderada con respecto a la oferta hídrica superficial disponible
1.0 - 10.01	Bajo	La presión es baja con respecto a la oferta hídrica superficial disponible
≤1	Muy bajo	La presión no es significativa con respecto a la oferta hídrica superficial disponible

Fuente: Saldarriaga & Carrillo (2012)

Responsabilidad: POA que puedan incidir en la oferta, calidad y/o uso del agua de una determinada cuenca hidrográfica.

Recursos: Durante la fase de diseño se podrá calcular con información secundaria de las estaciones de monitoreo del recurso hídrico y la información oficial del Estudio Nacional del Agua. En fase de operación deberá ser calculado con información primaria y el análisis de la información secundaria de los otros sectores económicos ubicados en la misma cuenca.

Periodicidad: Cuatrienal

Nivel de referencia: Subcuenca hidrográfica

Puntos de lectura: Estaciones de monitoreo, registros administrativos, mediciones directas

19. Índice de retención y regulación hídrica (IRH)

Objetivo: El índice resulta de la relación entre el volumen parcial equivalente, bajo la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales medios diarios, y el volumen total equivalente del área bajo la curva de caudales medios diarios. Tiene como finalidad mostrar la capacidad de una cuenca para mantener el régimen de caudales en las relaciones suelo-vegetación, y sus características morfométricas y físicas; lo que permite evaluar la regulación del sistema en su conjunto (Bernal & Santander, 2014).

Definición:

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Donde:

IRH : Índice de regulación hídrica

V_p : Volumen parcial equivalente bajo la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales medios diarios (m³)

V_t : Volumen total equivalente bajo la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales medios diarios (m³)

Se interpreta considerando que entre más cercano a uno este el valor del IRH, una determinada subcuenca hidrográfica tiene mayor regulación, lo que implica mayor homogeneidad o capacidad de regulación de los caudales. Por el contrario valores más cercanos a cero implican mayor variabilidad.

En la Tabla 29 se representa la categorización usada para la clasificación de los resultados.

Tabla 29. Interpretación del índice de Regulación Hídrica (IRH)

Rango IRH	Categoría de clasificación
> 0.85	Muy alta regulación hídrica
0.75 – 0.85	Alta regulación hídrica
0.65 – 0.75	Moderada regulación hídrica
0.50 – 0.65	Baja regulación hídrica
<0.50	Muy baja regulación hídrica

Fuente: Bernal & Santander (2014)

Responsabilidad: POA que puedan incidir en los procesos de regulación y retención de una determinada cuenca hidrográfica.

Recursos: Durante la fase de diseño se podrá calcular con información secundaria de las estaciones de monitoreo del recurso hídrico y la información oficial del Estudio Nacional del Agua. En fase de operación deberá ser calculado con información primaria.

Periodicidad: Cuatrienal

Nivel de referencia: Subcuenca hidrográfica

Puntos de lectura: Estaciones de monitoreo, registros administrativos, mediciones directas

20. Índice de vulnerabilidad hídrica (IVH)

Objetivo: Este índice relaciona el índice de uso del agua (IUA) y el índice de retención y regulación hídrica (IRH), por lo que refleja la susceptibilidad de los cuerpos hídricos para mantener la oferta, sobre todo cuando las condiciones locales de regulación y demanda propenden por el desabastecimiento. Al poder identificar la vulnerabilidad de determinadas zonas también se hace evidente su fragilidad frente condiciones como la variabilidad climática y las amenazas (por lo que pueden identificarse zonas de riesgo) y en ese sentido puede ser también una herramienta de planeación (IDEAM, 2016a).

La vulnerabilidad en los sistemas hídricos se relaciona con la alteración de los procesos naturales del ciclo hidrológico como la disminución de caudales, afectaciones a la recarga de acuíferos, capacidad de regulación y depuración hídrica causados por actividades antrópicas o por eventos naturales (IDEAM, 2016a). En relación con el índice, la vulnerabilidad está relacionada con el desabastecimiento o la fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta hídrica superficial (IDEAM, 2016a, 2019).

Definición: La evaluación del índice es de carácter cualitativo y depende de los resultados del IUA y del IRH y por lo tanto su cobertura se realiza sobre determinadas subzonas hidrográficas. En la Tabla 30 se muestra la evaluación basada en esta relación (IDEAM, 2016a).

Tabla 30. Matriz de calificación del Índice de Vulnerabilidad Hídrica – IVH con base en la relación del IUA y el IRH

Categoría		Índice de retención y regulación hídrica (IRH)			
		Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Índice de Uso del Agua (IUA)	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto
	Alto	Medio	Alto	Alto	Muy alto
	Muy alto	Medio	Alto	Alto	Muy alto
	Crítico	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto

Fuente: IDEAM (2016a)

Responsabilidad: Las actividades que puedan incidir en el uso del agua y por lo tanto en la disponibilidad de la misma en una determinada cuenca hidrográfica.

Recursos: Durante la fase de diseño se podrá calcular con información secundaria de las estaciones de monitoreo del recurso hídrico y la información oficial del Estudio Nacional del Agua. En fase de operación deberá ser calculado con información primaria.

Periodicidad: Cuatrienal (IDEAM, 2016a).

Nivel de referencia: Subcuenca hidrográfica.

Puntos de lectura: Estaciones de monitoreo, registros administrativos, mediciones directas

21. Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL)

Objetivo: Este índice permite establecer la vulnerabilidad potencial de un cuerpo de agua, un sistema hídrico o una subzona hidrográfica determinada⁷ en relación con los contaminantes vertidos por actividades circundantes y refleja la capacidad de recuperación de un cuerpo hídrico debido a su capacidad de dilución. Por lo tanto, mayores volúmenes de vertimiento significan el aumento de la vulnerabilidad del cuerpo hídrico a analizar (IDEAM, 2016b).

Definición:

$$IACAL_{jt-añomed} = \frac{\sum_{i=1}^n catiacal_{ijt-añomed}}{n}$$

Donde:

$IACAL_{jt-añomed}$: índice de la alteración potencial de la calidad del agua de una subzona hidrográfica j en un periodo t (usualmente anual), para determinada oferta hídrica en un año seco (IDEAM, 2016b).

⁷ El IDEAM define las subzonas hidrográficas a partir del mapa de zonificación hidrográfica en el que se establecen los planes de manejo y ordenamiento de cuenca (POMCA) (IDEAM, 2016b).

$catiacal_{ijt-añomed}$: categoría de clasificación de la vulnerabilidad definida por las presiones de la carga contaminante estimadas por una variable de calidad tipo i, en una subcuenca hidrográfica tipo j en un periodo t (IDEAM, 2016b).

n : Número de variables involucradas en el cálculo del índice. En este caso las variables son demanda química de oxígeno (DQO), la diferencia entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), y nitrógeno y fósforo total y, por lo tanto, n es igual a cinco (IDEAM, 2016b).

En la Tabla 31 se muestran las categorías de clasificación de vulnerabilidad para las diferentes variables.

Tabla 31. Rangos IACAL para las variables tipo i

DBO (t/ hm ³)	DQO DBO (t/ hm ³)	SST (t/ hm ³)	NT (t/ hm ³)	FT (t/ hm ³)	Categoría de Clasificación $catiacal_{ijt-añomed}$	Clasificación de la presión
<0.14	<0.14	<0.4	<0.03	<0.005	1	Baja
0.14-0.40	0.14-0.36	0.4-0.8	0.03-0.06	0.005-0.014	2	Moderada
0.40-1.21	0.36-1.17	0.8-1,9	0.06-0.14	0.014-0.036	3	Media
1.21-4.86	1.17-6.78	1.9-7.7	0.14-0.56	0.036-0.135	4	Alta
≥4.86	≥6.78	≥7.7	≥0.56	≥0.135	5	Muy Alta

Fuente: elaboración propia a partir de IDEAM (2016).

De acuerdo con el IDEAM (2016b), para estimar los valores **IACAL** de cada variable se aplican las siguientes formulas:

$$iacal_{ijt-añomed} = \frac{C_{ijt}}{O_{añomed}}$$

$$iacal_{ijt-añosec} = \frac{C_{ijt}}{O_{añosec}}$$

Donde:

$iacal_{ijt-añomed}$ o $iacal_{ijt-añosec}$ son estimaciones de la variable tipo i que se vierte en una subzona hidrográfica tipo j en un tiempo t en relación con la oferta hídrica del año (medio o seco).

C_{ijt} : Carga de la variable tipo i vertida en una subzona hidrográfica tipo j en un tiempo t.

$O_{añomed}$: Es la oferta hídrica en un año medio.

$O_{añosec}$: Es la oferta hídrica en un año seco.

Finalmente, el valor de IACAL para la subzona hidrográfica, luego de aplicados los cálculos, se clasifica de acuerdo con la Tabla 32.

Tabla 32. Rangos IACAL de clasificación de la vulnerabilidad de la subzona hidrográfica

$IACAL_{jt-año med}$ $IACAL_{jt-año sec}$ (t/ hm ³)	Categoría de clasificación $c_{at}i_{acal}i_{jtaño med}$		Clasificación de la presión
	1.0 - 1.5	1	Baja
	1.5 - 2.5	2	Moderada
	2.5 - 3.5	3	Media
	3.5 - 4.5	4	Alta
	4.5 - 5.0	5	Muy Alta

Fuente: IDEAM (2016b)

Responsabilidad: Las actividades que puedan incidir en el uso del agua y por lo tanto en la disponibilidad de la misma en una determinada cuenca hidrográfica.

Recursos: Durante la fase de diseño se podrá calcular con información secundaria de las estaciones de monitoreo del recurso hídrico y la información oficial del Estudio Nacional del Agua. En fase de operación deberá ser calculado con información primaria.

Periodicidad: Cuatrienal (IDEAM, 2016b)

Nivel de referencia: Subzona hidrográfica (IDEAM, 2016b)

Puntos de lectura: Estaciones de monitoreo, registros administrativos, mediciones directas

22. Índice de calidad del agua (ICA)

Objetivo: Este índice permite identificar las condiciones de calidad de una fuente de agua superficial y definir su vulnerabilidad, así como definir limitaciones o posibilidades de uso o instauración de determinadas actividades (IDEAM, 2013).

Definición:

$$ICA_{jk} = \sum_{i=1}^n W_i \times I_{ikjt}$$

Donde:

ICA_{jk} : Índice de calidad del agua para un determinado cuerpo de agua en un punto de monitoreo j, en un tiempo t (anual).

W_i : Ponderador de la variable tipo i

I_{ikjt} : Valor calculado de la variable tipo i, en la estación de monitoreo j, en un trimestre k en un tiempo t (anual).

En Colombia, el IDEAM pondera con el mismo valor (en un escala de 100%) las siguientes variables: oxígeno disuelto (OD), sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), conductividad eléctrica (CE), pH y la relación nitrógeno total / fósforo total (NT/FT) (IDEAM, 2013). Los valores de estas variables se asocian con el valor de referencia I_{ikjt} calculado de acuerdo con la Tabla 33.

Tabla 33. Valores de referencia para las variables de análisis del Índice de Calidad del Agua (ICA)

Variable	Descripción	Valor de referencia ICA
Oxígeno Disuelto (OD)	Esta variable permite definir la presencia o ausencia potencial de especies acuáticas. Este valor parte del cálculo del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto: $PS_{OD} = \frac{O_x \times 100}{C_p}$ Donde: PS_{OD}: porcentaje de saturación de oxígeno disuelto O_x: oxígeno disuelto medido en campo, asociado a la elevación, caudal y capacidad de reoxigenación. C_p: concentración de equilibrio de oxígeno (mg/l)	$I_{OD} = 1 - (1 - 0.001 \times PS_{OD})$ Cuando el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es mayor al 100%, entonces: $I_{OD} = 1 - (0.001 \times PS_{OD} - 1)$
Sólidos suspendidos totales (SST)	Indica el cambio en el estado de las condiciones hidrológicas en el cuerpo de agua, bien sea por procesos erosivos, vertimientos, extracción de materiales y disposición de escombros, entre otros.	$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 \times 1)$ Si SST ≤ 4,5 , entonces $I_{SST} = 1$ Si SST ≥ 320 , entonces $I_{SST} = 0$
Demanda química de oxígeno (DQO)	Permite reconocer las sustancias químicas susceptibles de ser oxidadas en condiciones fuertemente ácidas y alta temperatura.	DQO ≤ 20 , entonces $I_{DQO} = 0,91$ 20 < DQO ≤ 25 , entonces $I_{DQO} = 0,71$ 25 < DQO ≤ 40 , entonces $I_{DQO} = 0,51$ 40 < DQO ≤ 80 , entonces $I_{DQO} = 0,26$ DQO > 80 , entonces $I_{DQO} = 0,125$
pH	Mide la acidez o basicidad de los cuerpos hídricos, que ulteriormente puede afectar a la flora y fauna acuática.	$pH < 4$, entonces $I_{pH} = 0.1$ $4 \leq pH < 7$, entonces $I_{pH} = 0,02628419 e^{(pH \times 0,520025)}$ $7 \leq pH < 8$, entonces $I_{pH} = 1$ $8 \leq pH < 11$, entonces $I_{pH} = 1e^{((pH-8) \times -0,5187742)}$ $pH \geq 11$, entonces $I_{pH} = 0.1$
Conductividad eléctrica (CE)	Se relaciona con la suma de cationes y aniones y es indicador de la salinidad del agua.	$I_{CE} = 1 - 10^{(3,26+1,34 \log 10CE)}$ Si $I_{CE} < 0$, $I_{CE} = 0$
Nitrógeno total/Fósforo total	Mide el balance o desbalance de nutrientes en los cuerpos de agua, es un indicador de posibilidad de asimilación de carga orgánica.	$15 \leq NT/PT \leq 20$, entonces $I_{NT/NP} = 0.8$ $10 < NT/PT < 15$, entonces $I_{NT/NP} = 0.6$ $5 < NT/PT \leq 10$, entonces $I_{NT/NP} = 0.35$ $NT/PT \leq 5$ o $NT/PT > 20$ entonces $I_{NT/NP} = 0.15$

Fuente: elaboración propia a partir de IDEAM (2013)

Luego de la evaluación del índice, su interpretación se realiza de acuerdo con la Tabla 34.

Tabla 34. Calificación de la calidad del agua según el valor de ICA

Rangos de ICA	Calificación de la calidad del agua
0.00 - 0.25	Muy mala
0.26 - 0.50	Mala
0.51 - 0.70	Regular
0.71 - 0.90	Aceptable
0.91 - 1.00	Buena

Fuente: IDEAM (2013)

Responsabilidad: Actividades que tengan inferencia en la calidad del agua bien sea por la disposición de sustancias líquidas en los cuerpos de agua o por modificación de las condiciones que afecten su dinámica natural.

Recursos: Equipos de químicos y/o ingenieros químicos para la medición de las variables y la interpretación del índice de calidad del agua.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Cuerpos de agua susceptibles de ser afectados en el área de influencia

Puntos de lectura: Mediciones en campo e interpretación en laboratorio

23. Sólidos suspendidos totales (SST)

Objetivo: evaluar la variación en la concentración de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) por el desarrollo de las actividades de un proyecto. Los SST hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual⁸. Por tanto son partículas o materiales que son transportadas en el agua sin disolverse. Estos pueden ser no sedimentables, cuando miden menos de 0.01 mm, y sedimentables cuando superan este tamaño (IDEAM, 2007).

Definición:

$$\Delta SST = \frac{SST_0 - SST_t}{SST_0} \times 100$$

ΔSST : Variación de los sólidos suspendidos totales por la actividad en una subcuenca hidrográfica

SST_0 : Sólidos suspendidos totales antes de iniciar la operación

SST_t : Sólidos suspendidos totales en un tiempo t luego de iniciada la operación

Responsabilidad: Actividades que puedan generar aportes de partículas a los cuerpos de agua.

Recursos: Equipos profesionales en análisis físicos de la calidad del agua.

⁸ https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf

Periodicidad: Dos veces al año, en periodo seco y lluvioso.

Nivel de referencia: Área de influencia.

Puntos de lectura: Antes, en el punto y después del lugar de localización de la actividad en relación con la dirección de flujo del cuerpo de agua.

24. Sólidos sedimentables (SD)

Objetivo: Evaluar la variación en la concentración de los Sólidos Sedimentables por el desarrollo de las actividades de un proyecto. Los sólidos sedimentables son los materiales o partículas que se caracterizan por depositarse en el fondo de los cuerpos de agua (Sierra Ramírez, 2011).

Definición:

$$\Delta SS = \frac{SS_0 - SS_t}{SS_0} \times 100$$

Donde:

ΔSS : Variación de los sólidos sedimentables por la actividad en una subcuenca hidrográfica

SS_0 : Sólidos suspendidos sedimentables antes de iniciar la actividad

SS_t : Sólidos suspendidos sedimentables en un tiempo t luego de iniciada la actividad

Responsabilidad: Actividades que puedan generar aportes de partículas o materiales a los cuerpos de agua.

Recursos: Equipos profesionales en análisis físicos de la calidad del agua

Periodicidad: Dos veces al año, en periodo seco y lluvioso.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Antes, en el punto y después del lugar de localización de la actividad en relación con la dirección de flujo del cuerpo de agua

25. Sólidos totales (ST)

Objetivo: Evaluar la variación en la concentración de los Sólidos Totales por el desarrollo de las actividades de un proyecto. Los sólidos totales son materiales y partículas presentes en el agua, que quedan luego de evaporar la muestra de agua a una temperatura de 105°C, por tanto pueden ser tanto suspendidos como disueltos (Sierra Ramírez, 2011).

Definición:

$$\Delta ST = \frac{ST_0 - ST_t}{ST_0} \times 100$$

Donde:

ΔST : Variación de los sólidos totales por la actividad del Subsector de hidrocarburos en una subcuenca hidrográfica

ST_0 : Sólidos suspendidos totales antes de iniciar la operación

ST_t : Sólidos suspendidos totales en un tiempo t luego de iniciada la operación

Responsabilidad: Actividades con el potencial de depositar partículas o materiales en las fuentes hídricas

Recursos: Equipos profesionales en análisis físicos de la calidad del agua

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Antes, en el punto y después del lugar de localización de la actividad en relación con la dirección de flujo del cuerpo de agua

26. Turbiedad

Objetivo: La turbiedad es un fenómeno físico que le resta transparencia al agua, particularmente por la presencia de sólidos. El parámetro se mide en términos de UNT, JTU o SiO₂mg/L como unidades que representan la propiedad óptica de dispersión, absorción o reflectancia de la luz (Sierra Ramírez, 2011).

Definición:

$$\Delta Tu = \frac{Tu_0 - Tu_t}{Tu_0} \times 100$$

Donde:

ΔTu : Variación de la turbidez por la actividad de análisis en una subcuenca hidrográfica

Tu_0 : Medida de turbidez antes de iniciar la actividad

Tu_t : Medida de turbidez en un tiempo t luego de iniciada la actividad

Responsabilidad: Actividades con el potencial de disponer sustancias que modifiquen las condiciones de transparencia del agua como limos, arcillas, materia orgánica, compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos, entre otras.

Recursos: Equipos profesionales en el análisis fisicoquímico de las fuentes hídricas

Periodicidad: Dos veces al año, en periodo seco y lluvioso.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Antes, en el punto y después del lugar de localización de la actividad en relación con la dirección de flujo del cuerpo de agua

27. Índice de Langelier

Objetivo: Es un indicador de la estabilidad del agua que relaciona el pH medio con el pH en equilibrio o de saturación y permite identificar posibles niveles de corrosión e incrustación. El pH de saturación se calcula a partir de los parámetros de temperatura, sólidos disueltos totales, la dureza y la alcalinidad total (Granjeiro et al., 2009; Trujillo et al., 2008).

Definición:

$$I_L = pH - pH_s$$

$$pH_s = 9.3 + A + B - C - D$$

$$A = 0.1 \log(SDT) - 1$$

$$B = -13.12 \log(T + 273) + 34.55$$

$$C = \log(Du) - 0.4$$

$$D = \log(At)$$

Donde:

I_L : Índice Langelier

pH_s : pH de saturación

A, B, C, D : Variables que dependen de la temperatura, sólidos disueltos totales, la dureza y la alcalinidad total.

SDT : Sólidos suspendidos totales

T : Temperatura

Du : Dureza

At : Alcalinidad total

La interpretación de los resultados del índice se realiza de acuerdo con la Tabla 35.

Tabla 35. Interpretación del Índice de Langelier

Valor del Índice de Langelier	Interpretación
3	Incrustación extremadamente severa
1	Incrustación severa
0,5	Incrustación moderada
0	Estable
-0.5	Leve tendencia a la corrosión
-1	Tendencia moderada a la corrosión
-3	Tendencia muy fuerte a la corrosión

Fuente: Granjeiro et al. (2009)

Responsabilidad: Actividades que tengan el potencial de cambiar los niveles de pH de los cuerpos hídricos

Recursos: Equipos para mediciones fisicoquímicas en el agua

Periodicidad: Dos veces al año, en periodo seco y lluvioso

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Antes, en el punto y después del lugar de localización de la actividad en relación con la dirección de flujo del cuerpo de agua

28. Concentración de grasas y aceites

Objetivo: Este parámetro mide la concentración de grasas y aceites presentes en los cuerpos hídricos por causa de determinadas actividades que por sus características son potenciales generadoras de estos contaminantes (como la producción hidrocarburífera) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Definición:

$$\Delta[GA] = \frac{[GA]_0 - [GA]_t}{[GA]_0} \times 100$$

Donde:

$\Delta[GA]$: Variación de la concentración de grasas y aceites en el agua generados por una actividad

$[GA]_0$: Concentración de grasas y aceites en el agua antes de iniciar la actividad

$[GA]_t$: Concentración de grasas y aceites en el agua en un tiempo t luego de iniciada la actividad

Responsabilidad: Actividades que utilizan o tienen el potencial de generar residuos de grasas y/o aceites en las diferentes fases de sus procesos y que pueden afectar a las fuentes hídricas.

Recursos: Equipos profesionales en el análisis fisicoquímico de las fuentes hídricas

Periodicidad: Dos veces al año, en periodo seco y lluvioso.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Antes, en el punto y después del lugar de localización de la actividad en relación con la dirección de flujo del cuerpo de agua

29. Carga contaminante en el agua

Objetivo: La carga contaminante representa la cantidad de masa de una determinada sustancia contaminante que una actividad dispone o vierte en una fuente hídrica, se mide en unidades de masa en el tiempo. En términos generales, para su medición es necesario determinar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST), Sólidos Suspendedos (SS), Sólidos Disueltos (SD), Sólidos Sedimentables, Nitrógeno Total (Nt), Fósforo Total (Pt), Ortofosfato, Hidrocarburos (HC) y Grasas, aunque esto depende de las características técnicas de las actividades a analizar (IDEAM, n.d.; Decreto 3100 de 2003, 2003).

Definición:

$$C = [X] \times Q$$

Donde:

C : Carga contaminante

$[X]$: Concentración de la sustancia contaminante en relación con el volumen de la muestra (g/ m³)

Q : Caudal (m³/s)

Responsabilidad: Actividades que puedan aportar sustancias contaminantes puntuales a cuerpos de agua.

Recursos: Equipos de medición de sustancias contaminantes y laboratorios para el análisis.

Periodicidad: Dos veces al año en temporada seca y de lluvias.

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Mediciones en campo y laboratorios.

30. Potencial de eutrofización

Objetivo: La eutrofización es el enriquecimiento de aguas superficiales con nutrientes que propician el crecimiento de plantas o algas en los cuerpos acuáticos, limitando sus niveles de oxígeno (D. Moreno et al., 2010). El potencial de eutrofización se basa en el cálculo de la contribución de nutrientes al agua, lo que da como resultado el crecimiento acelerado de la biomasa, cuantificando este efecto por unidad de producto o servicio.

Definición:

$$PE = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L e_{pe,j} \times B_{lj}$$

Donde:

PE : Potencial de eutrofización

$e_{pe,j}$: Potencial de eutrofización de NO_x , NH_4 , N , PO_4^{3-} y P

B_{lj} : Aporte de NO_x , NH_4 , N , PO_4^{3-} y P por unidad de producto o servicio

Responsabilidad: Actividades que puedan propiciar el aporte de nutrientes a las fuentes hídricas bien sea por el manejo de suelos, el aporte directo, u otros.

Recursos: Equipos de profesionales en química o ingeniería química para mediciones en campo y análisis de laboratorio.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: En los cuerpos de agua en las inmediaciones de la actividad con diferentes radios de medición para determinar el alcance de los procesos de eutrofización provocados por la actividad.

31. Tasa de cambio en la concentración de bifenilos policlorados (PCB)

Objetivo: Los bifenilos policlorados (PCB) hacen parte del grupo de contaminantes orgánicos persistentes, caracterizados por tener propiedades tóxicas, ser persistentes a la degradación, bioacumularse y ser transportados por el aire, el agua y en el tránsito de las especies. Los bifenilos policlorados, por su parte, presentan características de toxicidad mayores o menores dependiendo de la cantidad de átomos de cloro en ellos (Arbeli, 2009).

Definición:

$$\Delta[PCB] = \frac{[PCB]_t - [PCB]_{t-1}}{[PCB]_{t-1}}$$

Donde:

$\Delta[PCB]$: Cambio en los niveles de concentración de PCB en dos periodos de análisis

$[PCB]_t$: Concentración de PCB en el tiempo t

$[PCB]_{t-1}$: Concentración de PCB en el tiempo t-1

Responsabilidad: Actividades que utilicen o puedan generar residuos de PCB

Recursos: Equipos para análisis de condiciones químicas de suelos y agua

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Mediciones en campo y análisis en laboratorio

32. Huella hídrica gris (HHg)

Objetivo: La huella gris permite conocer las cantidades de agua necesarias para diluir y/o asimilar determinadas cargas contaminantes. Su evaluación depende de las sustancias asociadas a las diferentes actividades, proyectos o industrias específicas con potencial de ser vertidas en los cuerpos de agua, por lo que permite establecer sus presiones por contaminación (González Martínez, 2016).

Definición:

$$HH_{Gris-hidrocarburos} = \sum_{i=1}^n \frac{CC_i}{C_{max_i} - C_{amb_i}}$$

$$CC_i = \frac{mC_i}{Ca}$$

Donde:

HH_{Gris} : Huella hídrica gris (m^3 /año)

CC_i : Carga contaminante, como el producto de la concentración másica de una sustancia contaminante tipo i por el caudal volumétrico que se encuentra en determinado sitio y se mide en T/año (IDEAM, 2019).

C_{max} : Concentración máxima admisible en el cuerpo receptor, obtenida a partir de los límites admisibles o también puede ser definido como la capacidad natural de dilución de sustancias en los cuerpos de agua (en los casos en que no exista normativa asociada a estos contaminantes) (T/m^3).

C_{amb} : Concentración ambiental (T/m^3).

mC_i : Concentración másica del contaminante tipo i .

Ca : Caudal volumétrico en determinado lugar del cuerpo de agua a analizar.

Responsabilidad: Actividades que tengan inferencia en la calidad del agua por la disposición de sustancias líquidas en los cuerpos de agua que afecten sus condiciones naturales de asimilación.

Recursos: Información de los proyectos, obras o actividades, sobre las sustancias dispuestas en los cuerpos de agua y equipos de medición de caudales.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia.

Puntos de lectura: Mediciones en campo e interpretación en laboratorio.

33. Huella Hídrica Azul (HHa)

Objetivo: La huella hídrica mide los consumos de agua de diferentes actividades, proyectos o industrias, considerando todos los procesos implicados desde la consecución de materia prima hasta el consumo y disposición de productos y servicios. Su cuantificación parte de la cantidad de agua que no retorna a la cuenca debido a su incorporación en productos, el trasvase o la evaporación (Water Footprint Network, 2002).

Definición:

$$HH_{A-Act} = A - E$$

Donde:

HH_{A-Act} : Huella hídrica azul de la actividad (L).

A : Afluente o volumen de agua usada en la actividad (L).

E : Efluente o volumen de agua calculada (L).

Responsabilidad: Actividades que requieran consumo de agua en sus diferentes fases hasta el producto o servicio final.

Recursos: Estimaciones de los consumos de agua por actividad en sus diferentes fases y bases de datos de consumo de agua cuando la actividad se encuentre en proceso, e información oficial sobre los cuerpos hídricos a intervenir.

Periodicidad: La huella hídrica se calcula antes de iniciar la actividad como medida de referencia sobre la que tomar decisiones sobre su implementación. Posteriormente, se hacen seguimientos anuales basados en las estadísticas de consumo de agua de las actividades teniendo en cuenta la variabilidad de la oferta hídrica, siendo especialmente relevante la medición en época seca.

Nivel de referencia: Área de influencia y los espacios en donde se realiza la actividad en sus diferentes fases

Puntos de lectura: Estadísticas de consumo de agua de la actividad e información oficial de las cuencas

34. Índice de eficiencia en el uso del agua

Objetivo: Refleja la relación entre la huella hídrica y la demanda de agua de la actividad, lo que permite definir que tan eficiente es el uso del agua en el consumo real (IDEAM, 2019).

Definición:

$$IEUA = \frac{HH_{A-Act}}{DH_{Act}}$$

Donde:

$IEUA$: Índice de eficiencia del uso del agua.

HH_{A-Act} : Huella hídrica azul de la actividad (L).

DH_{Act} : Demanda hídrica de la actividad

Responsabilidad: Actividades que requieran consumo de agua en sus diferentes fases hasta el producto o servicio final.

Recursos: Estimaciones de los consumos de agua por actividad en sus diferentes fases y bases de datos de consumo de agua cuando la actividad se encuentre en proceso, para definir la demanda.

Periodicidad: Dado el que índice parte de la estimación de la huella hídrica, debe ser calculada al inicio de la actividad y se debe hacer un seguimiento anual a partir del cálculo de la demanda real.

Nivel de referencia: Área de influencia y los espacios en donde se realiza la actividad en sus diferentes fases.

Puntos de lectura: Estadísticas de consumo de agua de la actividad e información de demanda.

35. Índice de uso de agua para la disolución de sustancias contaminadas

Objetivo: Es una medida de la cantidad de agua necesaria para diluir determinados contaminantes que puedan ser vertidos en el agua, por lo que representa el costo hídrico de la contaminación de las fuentes de agua. Asimismo, puede entenderse como un indicador de la capacidad de carga de una subcuenca hidrográfica.

Definición:

$$IUAC = \frac{HH_{G-Act}}{OH}$$

Donde:

$IUAC$: Índice de uso de agua para disolución de sustancias contaminantes
 HH_{G-Act} : Huella hídrica gris de la actividad (m³ /año)
 OH : Oferta hídrica disponible en determinada subzona hidrográfica

Responsabilidad: Actividades que potencialmente puedan generar vertimientos o derrames en fuentes hídricas.

Recursos: Caracterización de las sustancias que son usadas o se generan como residuos en las actividades e información oficial sobre la oferta hídrica de la zona o subzona.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia.

Puntos de lectura: Subcuenca hidrográfica e información de sustancias químicas usadas o generadas por la actividad.

36. Índice de amenaza asociada a la disponibilidad hídrica

Objetivo: De acuerdo con la *Guía para el ordenamiento del recurso hídrico continental superficial*, la amenaza asociada a la disponibilidad se relaciona con la calidad del agua, mediante el análisis cualitativo de los resultados del Índice de calidad del agua (ICA) (pág. 53) y del Índice Promedio Ponderado Hidrobiológico (IPPH) (pág. 113), como mínimo. La categorización de la amenaza se realiza asignando a los tramos la condición más desfavorable entre los índices utilizados, así:

1. Calidad aceptable con amenaza baja
2. Calidad regular con amenaza media y
3. Calidad mala con amenaza alta

Asimismo, la guía propone realizar un análisis de amenaza a partir de la comparación entre los objetivos de calidad definidos para cada tramo y las concentraciones de los parámetros físico-químicos respectivos, obtenidas de la simulación de escenarios de corto, mediano y largo plazo con el modelo de calidad del agua. Para cada uno de los escenarios simulados, se debe estimar el indicador de amenaza asociado a la disponibilidad mediante la ecuación que se incluye a continuación.

Definición:

$$I_A = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{OC_i}}{N}$$

Donde:

- I_A : Indicador de amenaza asociado a la disponibilidad hídrica.
- N : Número total de parámetros asociados a los objetivos de calidad para un determinado uso.
- C_i : Concentración del parámetro i , obtenida de los resultados de la simulación de escenarios.
- OC_i : Objetivo de calidad asociado al parámetro i .

Valores cercanos a uno (1) indican que las concentraciones esperadas de los respectivos parámetros estarán muy cerca al objetivo de calidad, por lo que esta condición se puede asociar a una amenaza alta. Por el contrario, valores de I_A cercanos a cero (0) indican que las concentraciones estarán muy por debajo de los objetivos de calidad, por lo que corresponderían a un nivel de amenaza bajo.

Responsabilidad: Actividades que potencialmente puedan generar vertimientos o derrames en fuentes hídricas que puedan afectar la calidad del agua.

Recursos: Caracterización de las aguas o estimación del comportamiento de los parámetros de calidad e información oficial del cuerpo de agua.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia del componente hidrológico.

Puntos de lectura: Subcuenca hidrográfica e información de sustancias químicas usadas o generadas por la actividad.

37. Índice de compacidad

Objetivo: Relaciona el perímetro de la cuenca con respecto al perímetro de un círculo con su misma área. Es un índice adimensional que funciona como descriptor de la geometría de la cuenca e indica que tanto su forma se acerca a la de un círculo (CVC & Consorcio POMCA Quindío, 2017; Delgado Quintero et al., 2019).

Definición:

$$K_c = \frac{P_c}{2\pi \left(\frac{A_c}{\pi}\right)^{1/2}}$$

Donde:

- K_c : Índice de compacidad de la cuenca
- P_c : Perímetro de la cuenca (km)
- A_c : Área de la cuenca (km²)

El resultado representa la geografía de la cuenca y se interpreta de acuerdo con la Tabla 36.

Tabla 36. Interpretación del índice de compacidad de la cuenca

Clase	Rango	Características de la forma de la cuenca
Kc ₁	1 – 1.25	De redonda a oval-redonda
Kc ₂	1.25 – 1.5	Oval-oblonga
Kc ₃	>1.5	De oval-oblonga a rectangular-oblonga

Fuente: CVC & Consorcio POMCA Quindío (2017)

Responsabilidad: Las actividades que puedan incidir en la forma de la cuenca deben partir de una valoración inicial y realizar monitorio a los cambios.

Recursos: Cartográficos, imágenes aéreas, SIG

Periodicidad: Esta medición debe realizarse desde un valor de referencia (o línea base de la cuenca) y cuando se introduzcan actividades o eventos con la capacidad de transformar la morfología de la cuenca.

Nivel de referencia: Cuenca

Puntos de lectura: Imágenes remotas

38. Factor de forma

Objetivo: La forma de las cuencas define la interacción hidrológica, geológica y estructural del drenaje. El factor de forma relaciona el ancho promedio de la cuenca con el largo del cauce principal de la cuenca o longitud axial. Esta relación afecta los caudales de la cuenca, debido a que al incrementarse las áreas aumentan también los caudales mínimos, promedios y máximos (Cortolima, 2015; Quijano, 2014). Un valor de K_f superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas.

Definición:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

K_f: Factor de forma

A: Área de la cuenca en Km²

L²: Longitud del cauce principal de la cuenca

La interpretación de este índice se realiza según la Tabla 37.

Tabla 37. Interpretación de factor de forma de la cuenca

Rango	Características de la forma de la cuenca
0.01 – 0.18	Muy poco achatada
0.19 – 0.36	Ligeramente achatada
0.37 – 0.54	Moderadamente achatada

Fuente: Cortolima (2015)

Responsabilidad: Las actividades que puedan incidir en la forma de la cuenca deben partir de una valoración inicial y monitorear a los cambios.

Recursos: Información oficial, imágenes aéreas, SIG

Periodicidad: Esta medición debe realizarse desde un valor de referencia (o línea base de la forma de la cuenca) y cuando se introduzcan actividades o eventos con la capacidad de transformar la morfología de la cuenca.

Nivel de referencia: Cuenca o subcuenca hidrográfica

Puntos de lectura: Imágenes remotas

39. Densidad de drenaje

Objetivo: Se define como la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y su área total, representando así una medida de longitud por unidad de superficie y en consecuencia, constituye una medida de disección. Se ha demostrado que está íntimamente ligada con la precipitación en cuantía e intensidad con que ésta se produce; pero además la densidad va a depender de la litología, de las características del suelo (principalmente de su capacidad de infiltración) y de la cubierta vegetal existente. Numerosos trabajos realizados en diferentes climas han puesto de manifiesto la importancia de todos estos factores, relacionando los valores de densidades obtenidos con características climáticas, litológicas, edáficas y de cubierta vegetal (Romero Díaz & Bermúdez López, 1987). La densidad de drenaje es mayor en cuencas con rocas blandas de baja permeabilidad y en regiones con escasa cobertura vegetal, especialmente donde la precipitación se distribuye en lluvias intensas y espaciadas.

Definición:

$$D = \frac{\sum L_i}{A_c}$$

Donde:

D : Densidad de drenaje
 L_i : Longitud total de los drenajes (km)
 A_c : Área total de la cuenca (km²)

Responsabilidad: Las actividades que puedan incidir en la forma de la cuenca deben partir de una valoración inicial y monitorear a los cambios.

Recursos: Información oficial, imágenes aéreas, SIG

Periodicidad: Esta medición debe realizarse desde un valor de referencia (o línea base de la forma de la cuenca) y cuando se introduzcan actividades o eventos con la capacidad de transformar la morfología de la cuenca.

Nivel de referencia: Cuenca o subcuenca hidrográfica

Puntos de lectura: Imágenes remotas

40. Índice de sinuosidad

Objetivo: El índice de sinuosidad refleja la forma del canal, al considerar que frecuentemente su longitud no se corresponde con la longitud del valle. Para determinar la relación existente entre ambas longitudes, Schumm propuso este índice en 1963, como resultado de dividir la longitud del canal por la longitud del valle, creando cinco categorías de sinuosidad (Romero Díaz & Bermúdez López, 1987).

Definición:

$$IS = \frac{L_c}{L_v}$$

Donde:

IS : Índice de sinuosidad
 L_c : Longitud del canal (km)
 L_v : Longitud del valle (km)

Tabla 38. Categorías de sinuosidad

Tipo de canal	Sinuosidad	Caracterización
Recto	1.0 – 1.2	Se caracterizan por desarrollarse en áreas de fuertes pendientes. Baja sinuosidad.
Transicional	1.2 – 1.5	Baja sinuosidad.
Regular	1.5 – 1.7	Cambios direccionales importantes. Sinuosidad media.
Irregular	1.7 – 2.1	Cambios direccionales importantes con bahías.
Tortuoso	> 2.1	Tendiente atrenzamiento del canal.

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC⁹

Responsabilidad: Las actividades que puedan incidir en la forma de la cuenca deben partir de una valoración inicial y monitorear a los cambios.

Recursos: Información oficial, imágenes aéreas, SIG

Periodicidad: Esta medición debe realizarse desde un valor de referencia (o línea base de la forma de la cuenca) y cuando se introduzcan actividades o eventos con la capacidad de transformar la morfología de la cuenca.

Nivel de referencia: Cuenca o subcuenca hidrográfica

Puntos de lectura: Imágenes remotas

Componente hidrogeológico

41. Índice de vulnerabilidad intrínseca (GOD)

Objetivo: Este índice evalúa la susceptibilidad de cuerpos de agua subterránea a ser afectados por cargas contaminantes, basado en sus características intrínsecas: el grado de confinamiento, varía entre 0 (ausencia de acuíferos) y 1 (acuífero libre o freático); la ocurrencia del sustrato subyacente, que se realiza a partir de la caracterización de la zona no saturada del acuífero o las capas confinantes (en este caso los índices bajos corresponden a materiales no consolidados y los índices altos a rocas compactas, fracturadas o karstificadas); y la profundidad del nivel freático de los acuíferos libres o la profundidad del techo del acuífero en el caso de los confinados (Área Metropolitana Valle de Aburrá, 2018).

Definición:

$$IV = G \times O \times D$$

Donde:

- IV*: Índice de vulnerabilidad intrínseca
- G*: Grado de confinamiento hidráulico (Tabla 39).
- O*: Ocurrencia del sustrato suprayacente, resulta de una clasificación basada en características litológicas y de grado de consolidación de la zona saturada o las capas confinantes (Tabla 40).
- D*: Profundidad del nivel freático en acuíferos libres o la profundidad del techo del acuífero en los que se encuentran confinados (Tabla 41).

Tabla 39. Grado de confinamiento hidráulico

	Valor
Ninguno	0
Surgente	0
Confinado	0.2
Semiconfinado	0.4
No confinado (cubierto)	0.6
No confinado	0.2

Fuente: Área Metropolitana Valle de Aburrá (2018)

Tabla 40. Consolidación y características litológicas

Consolidación	Características litológicas	Valor
No consolidado (sedimentos)	Arcillas lacustres y estuarios	0.4
	Suelos residuales	0.4
	Limos aluviales, loess, till, glaciares	0.5
	Arenas eólicas	0.6
	Arenas aluviales y fluvio-glaciares	0.7
	Gravas coluviales	0.8
Consolidado	Arcillas, lutitas	0.5

Consolidación	Características litológicas	Valor
(roca porosa)	Limolitas, tobas volcánicas	0.6
	Areniscas	0.8
	Calizas blandas calcarenitas*	0.9
Consolidado (roca densa)	Formaciones ígneas/metamórficas + volcánicas antiguas	0.6
	Lavas volcánicas resientes*	0.8
	Caliche + calizas karstificadas*	1.0

Fuente: Área Metropolitana Valle de Aburrá (2018)

Tabla 41. Profundidad

Profundidad	Valor
>50 m	0.6
20 – 50 m	0.7
5 – 20 m	0.8
< 5 m	0.9
* Cualquier profundidad	1

Fuente: Área Metropolitana Valle de Aburrá (2018)

Responsabilidad: Actividades que puedan generar cambios en las condiciones de calidad de acuíferos.

Recursos: Equipos para análisis de suelos, medición de la profundidad y análisis del sistema de agua subterránea, y sistemas de información geográfica.

Periodicidad: Una vez al año

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Mediciones en campo, análisis de laboratorio y SIG.

42. Índice de escasez para agua subterránea

Objetivo: Este índice permite estimar las presiones que hay sobre las aguas subterráneas, a partir de la comparación entre los caudales captados en el periodo de un año y el caudal disponible del acuífero a analizar (Aristizabal et al., 2014).

Definición:

$$IEG = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{Ci}}{Q_E}$$

Donde:

IEG : Índice de escasez de aguas subterráneas.

Q_{Ci} : Caudal obtenido del i-ésimo punto de captación (m³/año).

Q_E : Caudal disponible total de la unidad acuífera (m³/año).

Responsabilidad: Las actividades que capten agua de algún tipo de fuente de agua subterránea deben evaluar este índice, considerando a su vez la coexistencia con otras actividades que influyan en el aumento de la demanda de consumo de agua para definir la pertinencia de aumentar el consumo del líquido. Asimismo, las autoridades ambientales deben incluir dentro de sus determinaciones y criterios con respecto al otorgamiento de licencias y/o permisos la condición de los acuíferos a intervenir.

Recursos: Información oficial del IDEAM, CAR, INGEOMINAS.

Periodicidad: Anual (Aristizabal et al., 2014).

Nivel de referencia: Unidad acuífera

Puntos de lectura: Unidad acuífera

43. Índice de extracción de agua subterránea (IEAS)

Objetivo: Es una medida de la presión de actividades que demandan agua de fuentes subterráneas, mediante una relación entre el volumen de agua extraído y la capacidad de recarga de los acuíferos (CAR, 2017). Para la estimación particularizada por actividad, se parte de una medida de presión multisectorial como referente para la estimación de la participación de la actividad en las presiones sobre las aguas subterráneas.

Definición:

$$IEAS = \frac{DAS}{R}$$

$$IEAS_{Act} = \frac{DAS_{Act}}{R}$$

$$IEAS_{\%Act} = \frac{IEAS_{Act}}{IEAS} \times 100$$

Donde:

$IEAS$:	Índice de extracción de aguas subterráneas multisectorial.
$IEAS_{Act}$:	Índice de extracción de aguas subterráneas por parte de la actividad a analizar
$IEAS_{\%Act}$:	Participación de la actividad en las presiones de extracción de agua subterránea en determinada subzona hidrográfica.
DAS :	Demanda de agua subterránea en determinada subzona hidrográfica agregada para el conjunto de sectores productivos.
DAS_{Act} :	Cantidad de agua extraída desde fuentes subterráneas para la actividad a analizar
R :	Recarga o volumen medio anual de agua que se infiltra y llega al acuífero.

Responsabilidad: Actividades que demanden aguas de fuentes subterráneas.

Recursos: Información oficial disponible y caracterización de la demanda de aguas subterráneas de la actividad.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia del componente hidrogeológico.

Puntos de lectura: Información oficial y métricas de extracción de la actividad.

44. Sobreexplotación del acuífero

Objetivo: La sobreexplotación de un acuífero puede ser establecida desde el balance hídrico, como la diferencia de entradas y salidas al sistema, con métodos de análisis de evolución de los niveles de agua donde existe explotación (Romero et al., 2017).

Definición:

$$\Delta A = E - S$$

$$E = I_e + R_{iaag} + R_{ipu} + I_{rio} + E_h$$

$$I_e = C_e(V_p - V_{ETR})$$

$$E_h = \sum_{j=1}^{nc} T_j \times a_j \times i_j$$

$$S = Q_P + V_{DNC} + S_H$$

Donde:

- ΔA : Cambio de almacenamiento, la sobreexplotación ocurre cuando $S > E$
 E : Entradas totales de agua al acuífero
 S : Salidas totales de agua del acuífero
 I_e : Infiltración efectiva de la precipitación
 C_e : Coeficiente de escurrimiento
 V_p : Volumen de precipitación sobre el área del acuífero
 V_{ETR} : Volumen de evapotranspiración por los cultivos agrícolas y la vegetación natural
 R_{iaag} : Retorno inducido por uso agrícola, o volumen de agua que se infiltra en los acuíferos en las pérdidas dentro de la producción agropecuaria.
 R_{ipu} : Retorno inducido por el uso público-urbano, ocurre como pérdida en los usos urbanos
 I_{rio} : Infiltración proveniente de los ríos
 E_h : Entradas horizontales de agua al acuífero
 T_j : Transmisividad
 a_j : Ancho del canal de flujo (m)
 i_j : Gradientes hidráulicos
 nc : Número de canales de flujo de entrada
 Q_P : salidas de aprovechamiento de aguas subterráneas o la suma de todos los aprovechamientos por bombas y norias existentes en el área del acuífero.
 V_{DNC} : Descarga natural comprometida, resulta de la suma de volúmenes de agua que pasan a ser de forma natural en superficiales.
 S_H : salidas del horizonte del acuífero (calculada de la misma forma que E_h).

Otra forma de medir la sobreexplotación, sin necesidad de estimar recarga y extracciones se hace a través del seguimiento de los niveles de agua en donde existe explotación, así (Romero et al., 2017):

$$\Delta A = \sum_{i=1}^{nc} a_i \times h_i \times S_i$$

Donde:

- ΔA : Cambio de almacenamiento, la sobreexplotación pasa cuando ΔA es negativo ($m^3/año$)
- nc : Número de celdas
- a_i : Área de la celda (m^2)
- h_i : Evolución media o variación de la carga hidráulica ($m/año$), entendida como la evolución de los niveles piezométricos del acuífero por cada celda
- S_i : Coeficiente de almacenamiento por cada celda

Responsabilidad: La medición de la sobreexplotación debe ser monitoreada por las actividades que usan el agua de los acuíferos en sus procesos productivos. De ser necesario, requiere unión de actividades para estimar las presiones de cada una en los acuíferos.

Recursos: Equipos para la edición de diferentes variables hidrológicas, hidrogeológicas y climáticas, así como para análisis de evapotranspiración de las plantas. Asimismo, se requiere de la utilización de Sistemas de Información Geográfica.

Periodicidad: Dos veces al año en temporadas secas y lluviasas.

Nivel de referencia: Acuíferos intervenidos en el área de influencia.

Puntos de lectura: Mediciones en campo y SIG

45. Salinidad

Objetivo: Este indicador busca identificar los niveles de salinización por disolución de sales en un acuífero y se evalúa a partir de la medición en diferentes puntos de control, los cuales pueden ser definidos a partir de métodos de muestreo, en relación con un superficie definida (García Rodríguez et al., 2005).

Definición:

$$PSA_{\%} = \frac{NP_{>250mg/l}}{NPC_{SA}}$$

Donde:

- $PSA_{\%}$: Porcentaje de puntos salinizados en la superficie de análisis
- $NP_{>250mg/l}$: Número de puntos de control con más de 250 mg/l de cloruros
- NPC_{SA} : Número de puntos controlados en una superficie de análisis

Responsabilidad: Actividades que puedan generar cambios en los niveles de salinidad de acuíferos.

Recursos: Equipos de medición de salinidad en acuíferos.

Periodicidad: Dos mediciones anuales (en época de lluvias y en época seca).

Nivel de referencia: Acuíferos que se encuentren en el área de influencia hidrogeológica.

Puntos de lectura: Diferentes puntos de control dentro de la superficie de análisis del acuífero.

46. Índice de calidad de aguas subterráneas (ICA-AS)

Objetivo: Este índice evalúa la calidad del agua subterránea para uso humano o doméstico y es usado para establecer si la captación es viable o no para captación de consumo. Las variables que se evalúan son coliformes fecales, nitratos, pH, dureza, hierro, turbiedad y color (Área Metropolitana Valle de Aburrá, 2018).

Definición:

$$ICA - AS = \sum_{i=1}^n (Y_i \times P_i)$$

Donde:

ICA - AS: ICA para aguas subterráneas.

Y_i: Valor de calificación (Tabla 42).

P_i: Valor de peso del parámetro (Tabla 42).

Tabla 42. Valores de Y y P para cada parámetro

Parámetro de calidad	Concentración	Y _i	P _i
Coliformes fecales (CF) (microor/cm³) o (UFC/cm³)	0	10	0.3
	0 - 500	$4 \times 10^{-5} \times (CF)^2 - 0,04 \times (CF) + 10$	
	500 - 1000	0	
	1000 - 5000	-2	
	5000 - 10000	-3	
	>10000	-4	
Nitratos (N) (mg N-NO₃/L)	≤10	10	0.25
	10-25	$0,0177 (N)^2 - 1,2849(N) + 21,068$	
	>25	0	
pH	<2.5 o >10	0	0.07
	6.5 - 9	10	
	2.5 - 6.5	$2,5(pH) - 6,25$	
	9 -10	$-10(pH) + 100$	
Dureza (D) (mg/l CaCO₃)	≤160	10	0.07
	160-200	$-0.25(D) + 50$	
	>200	0	
Hierro (H) (mg Fe/L)	≤0.3	0	0.07
	0.3 - 1	10	

Parámetro de calidad	Concentración	Yi	Pi
	>1	$17,191(H)^2 - 36,393(H) + 19,266$	
Turbiedad (T) (UNT)	≤5	10	0.12
	5-25	$-0.5 (T) + 12.5$	
	>25	0	
Color (C) (UPC)	≤15	10	0.12
	15-35	$-0.5 (C) + 17.5$	
	>35	0	

Fuente: Área Metropolitana Valle de Aburrá (2018)

La interpretación del índice se realiza de acuerdo con la Tabla 43.

Tabla 43. Interpretación del ICA-AS

Valor ICA-AS	Calificación
10	Excelente
9-10	Muy Buena
6-9	Buena
5-6	Regular
2.5-5	Mala
0-2.5	Muy mala

Fuente: Área Metropolitana Valle de Aburrá (2018)

Responsabilidad: Actividades que capten aguas subterráneas para consumo o que puedan generar cambios en sus condiciones de calidad.

Recursos: Equipos de medición de los diferentes parámetros y laboratorios para análisis de muestras.

Periodicidad: Dos veces al año en temporada seca y temporada de lluvias.

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Mediciones en campo y análisis en laboratorio.

Componente oceanográfico

47. Cambio de la temperatura superficial del mar

Objetivo: Debido a los diferentes fenómenos climáticos y la realización de actividades que propician el incremento de la temperatura en los océanos, se generan, por ejemplo, afectaciones en praderas de pastos marinos y arrecifes de coral (susceptibles al blanqueamiento), propiciando pérdidas de cobertura y productividad que pueden afectar las diferentes formas de vida marina (Rojas-Higuera & Pabón-Caicedo, 2015). En este sentido, la medición y monitoreo de cambios de temperatura es una medida para definir la vulnerabilidad marítima y es a su vez una herramienta de planeación.

La temperatura superficial del mar es un indicador que refleja la incidencia de los fenómenos climáticos al expresar los intercambios de calor y humedad (IDEAM, 2010a).

Definición:

$$\Delta TSM = \frac{TSM_t - TSM_0}{TSM_0}$$

Donde:

ΔTSM : Cambio en la temperatura superficial del mar

TSM_0 : Temperatura superficial del mar en un tiempo inicial

TSM_f : Temperatura superficial del mar en un tiempo t

Estas mediciones pueden hacerse de manera puntual en diferentes partes de la zona de influencia de una actividad con potencial de cambiar la temperatura del mar o a partir de herramientas de percepción remota, cuándo la resolución espacial se ajuste a las necesidades de monitoreo.

Responsabilidad: Esta medición debe ser monitoreada por las autoridades ambientales y por las actividades que tienen potencial de modificación de la temperatura local de las aguas marinas. En este caso, los responsables de las actividades deben informar periódicamente los cambios de temperatura en su área de influencia.

Recursos: Cartográficos, información satelital, instrumentos de medición, software de monitoreo.

Periodicidad: Esta medición debe realizarse desde temperaturas de referencia que consideren los cambios en diferentes periodos del año, por lo que las mediciones comparativas deben ser de periodos similares año a año. Debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades o eventos con la capacidad de modificar la temperatura oceánica.

Nivel de referencia: Área dentro de los límites marinos de la nación y áreas de influencia de proyectos realizados en el mar.

Puntos de lectura: Imágenes remotas y mediciones puntuales.

48. Acidificación del océano

Objetivo: Los océanos son sumideros de CO₂ y son parte fundamental del balance climático planetario. Sin embargo, el incremento de la concentración de CO₂ atmosférico proveniente de la quema de combustibles fósiles ha generado desequilibrios provocado la disminución del pH en los océanos. Este proceso afecta la vida marina (corales, pastos marinos, algas y biodiversidad) y refuerza los procesos de cambio climático (Heinrich-Böll-Stiftung, 2017; Rojas-Higuera & Pabón-Caicedo, 2015).

Definición: El pH mide la acidez o la basicidad de una sustancia de acuerdo con la concentración de iones de hidrógeno (H⁺). Su medida es representada en una escala de 0 a 14, donde 0 implica mayor acidez, 14 mayor basicidad y 7 neutralidad. Cada cambio en una unidad en esta escala corresponde a un cambio en 10 veces la concentración como se muestra en la Tabla 44 (Harrould-Kolieb & Savitz, 2009).

Tabla 44. Valores de pH y relación con la concentración de iones de hidrógeno

pH	Concentraciones de iones hidrógeno en comparación con agua destilada (pH)
0	10.000.000
1	1.000.000
2	100.000
3	10.000
4	1.000
5	100
6	10
7	1
8	1/10
9	1/100
10	1/1.000
11	1/10.000
12	1/100.000
13	1/1.000.000
14	1/10.000.000

Fuente: elaboración propia

Si bien los procesos de acidificación se asocian a procesos globales, a nivel local se puede disminuir el pH por la implementación de actividades que incrementen la emisión de carbono o directamente dispongan sustancias en el mar que puedan modifiquen este parámetro.

Responsabilidad: Esta medición debe ser monitoreada por las autoridades ambientales y por las actividades que tienen potencial de modificación del pH marino. En este caso, los responsables de las actividades deben informar periódicamente los cambios que se presenten en su área de influencia.

Recursos: Cartográficos, instrumentos de medición, software de monitoreo.

Periodicidad: Esta medición debe realizarse considerando los cambios en diferentes periodos del año, por lo que las mediciones comparativas deben ser de periodos similares año a año. Debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades o eventos con la capacidad de modificar el pH del agua.

Nivel de referencia: Área dentro de los límites marinos de la nación y áreas de influencia de proyectos realizados en el mar.

Puntos de lectura: Imágenes remotas y mediciones puntuales.

49. Acreción

Objetivo: La acreción sucede por una acumulación de sedimentos que sobrepasa el nivel de las mareas, con tasas de retención de materia elevadas. Los procesos de acreción dan lugar al crecimiento de playas y acumulación costera. El fenómeno también puede darse en sistemas acuáticos que se localizan en depresiones de terrenos como los humedales (Navarrete-Ramirez, 2014; Sanchez Carrillo et al., 2000).

Definición:

$$A = \sum_{i=1}^{12} \frac{SED_i}{\rho_{aparente}}$$

Donde:

A : Acreción
 SED_i : Tasa de sedimentación (g/ cm² mes) para cada mes del año
 $\rho_{aparente}$: Densidad aparente del sedimento (g/cm³)

Responsabilidad: Actividades que propicien la movilidad de sedimento hacia fuentes hídricas

Recursos: Información cartográfica de terreno, equipos de profesionales para mediciones en campo

Periodicidad: Mensual

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad

Puntos de lectura: Información remota y mediciones en campo

Componente atmosférico

50. Inventario de emisiones atmosféricas (IEA)

Objetivo: El IEA determina la suma total de las emisiones de contaminantes atmosféricos, integrando el tipo de fuente y la cantidad de contaminantes emitidos, dentro de un área geográfica y en un intervalo de tiempo. Bajo estas premisas, el inventario es un instrumento de gestión ambiental que permite la ejecución de procesos de control y evaluación para la toma de decisiones y la implementación de programas para disminuir las presiones por emisiones (Gaitán & Cárdenas, 2017). El inventario se realiza a partir de una caracterización de las sustancias emitidas por la actividad, que pueden ser clasificadas según la Tabla 45 y a partir de ello se generan las estrategias de control, análisis y gestión.

Tabla 45. Clasificación de contaminantes atmosféricos

Clasificación de contaminantes atmosféricos	Descripción	Ejemplos
Contaminantes criterio	Contaminantes que por sus concentraciones en la atmósfera y sus efectos en la salud y el ambiente son considerados de referencia	CO, NO ₂ , SO ₂ , material particulado (MP), O ₃
Gases de efecto invernadero (GEI)	Compuestos químicos en estado gaseoso que se acumulan en la atmósfera y son capaces de absorber y reemitir radiación infrarroja aumentando la temperatura de atmósfera baja Compuestos	CFC, CH ₄ , N ₂ O, CO ₂
Sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO)	Compuestos químicos con potencial para reaccionar con las moléculas de ozono de la atmósfera que producen la destrucción y adelgazamiento	HCFC, HBFC, CFC, BFC

Clasificación de contaminantes atmosféricos	Descripción	Ejemplos
Sustancias tóxicas	Compuestos químicos que generar efectos nocivos en la salud y el ambiente	Dioxinas, furanos, arsénico, metales

Definición:

$$IEA = \sum_{i=1}^n E_{ijt}$$

Donde:

IEA: Inventario de emisiones atmosféricas para la sustancia o mezcla de sustancias *j* en un periodo de tiempo *t*, medido en unidades de masa.

E_{it}: Emisión atmosférica de la sustancia o mezcla de sustancias *j*, generada por una operación *i* (dentro de la actividad) en un periodo de tiempo *t*.

n: Número de operaciones que tienen emisiones sustancias a la atmósfera dentro de la actividad a analizar.

Responsabilidad: Actividades con operaciones que generen emisiones atmosféricas.

Recursos: Equipos muestreadores que capturan muestras directamente en chimenea (o punto de emisión) y de análisis de estas. También puede realizarse a través de balance de masas, para lo que se necesita equipos profesionales especializados en estos procesos.

Periodicidad: Mensual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Puntos de emisiones fijas dentro de la actividad

51. Índice de precipitación

Objetivo: Este índice expresa una relación entre la precipitación anual o mensual como un valor medio de precipitación anual o mensual (mínimo 30 años). Su valor permite identificar que tan alejada se encuentra la precipitación respecto a su valor histórico y en ese sentido monitorear los escenarios de variabilidad climática, fenómenos ENSO, entre otros (González Gómez & Santander Durán, 2016)

Definición:

$$IP = \frac{P_t}{\bar{P}_t} \times 100$$

$$P_t = \left(\frac{\sum_{l=1}^m P_{tl}}{m} \right)$$

Donde:

- IP : Índice de precipitación mensual o anual (%)
 P_t : Precipitación acumulada mensual o anual (mm)
 $\bar{P}_t$: Precipitación media mensual o anual en m años (mm)
 P_{tm} : Precipitación del tiempo t (mes o año) del año m
 m : Número de años del análisis

Responsabilidad: Actividades que puedan afectar los niveles de precipitación por causas asociadas a la modificación de coberturas y fuentes hídricas, o cuyos procesos generan condiciones que afecten a este fenómeno.

Recursos: Estaciones de monitoreo, sistema de información para la gestión de datos hidrológicos y meteorológicos del IDEAM, información cartográfica y remota, SIG.

Periodicidad: Mensual, anual. Asimismo, este índice puede ser medido a escala estacional, interestacional, interanual e interdecadal.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Estaciones de monitoreo y SIG

52. Anomalía de temperatura media

Objetivo: Este índice mide el comportamiento de la temperatura, en una escala determinada, para un tiempo dado; evidenciando la desviación en relación con una media histórica (con un mínimo de 30 años para establecer una norma meteorológica). Además, permite identificar tendencias, propensión a la sequía y variabilidad durante el fenómeno ENSO (Niño, Niña y Oscilación del Sur) (Correa & Bulla, 2012)

Definición:

$$ATM_{ijt} = tm_{ijt} - tpm_{ij} \qquad tpm_{ij} = \left(\frac{\sum_{l=1}^m tmm_{ijl}}{m} \right)$$

Donde:

- ATM_{ijt} : Anomalía de temperatura media de la unidad espacial de referencia i , para el mes j , en el año t de análisis.
 tm_{ijt} : Temperatura media del aire medida entre 1.25 m y 2 m sobre la superficie en una unidad espacial de referencia i , para el mes j en el año t de análisis.
 tpm_{ij} : Temperatura promedio multianual en la unidad espacial de referencia i , en el mes j .
 tmm_{ijl} : Temperatura media del aire del periodo i , registrada en la unidad de referencia j , en el año l .
 m : Número de años para los que se ha contabilizado el dato de temperatura media.

Entre mayor sea el valor absoluto de la anomalía, esta se aleja más de su medida central. Para controlar esta variación es posible determinar la desviación estándar de la anomalía, con el fin de establecer los límites inferior y superior sobre los que se pueda hacer el monitoreo.

Responsabilidad: Actividades que puedan afectar la temperatura media local debido a que generan remoción de coberturas, o cuyos sus procesos implican la generación de islas de calor o que propicien condiciones para que suceda este fenómeno u otros de modificación significativa de la temperatura.

Recursos: Estaciones de monitoreo, sistema de información para la gestión de datos hidrológicos y meteorológicos del IDEAM, información cartográfica y remota, SIG.

Periodicidad: Mensual y anual.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Estaciones de monitoreo y SIG

53. Potencial de calentamiento global (GWP)

Objetivo: El índice de potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) estima el nivel de calentamiento que podría alcanzarse con la emisión de determinada masa de gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases tiene la capacidad de absorber parte de la radiación infrarroja del espectro electromagnético (causante del calentamiento). En la Tabla 46 se presenta un listado propuesto por el IPCC de gases con efecto directo en el calentamiento (Danny Harvey, 1993; IPCC, 2007).

Definición:

$$GWP = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L e_{gwpj} \times B_{lj}$$

Donde:

GWP: Índice de potencial de calentamiento global.

e_{gwpj} : Factor de calentamiento de la emisión tipo j en diferentes periodos (Tabla 46).

B_{lj} : Masa del gas tipo j emitido en un horizonte temporal l (usualmente asociado al ciclo de vida del producto).

Tabla 46. Factores de potencial de calentamiento global relativos al CO₂ para diferentes GEI

Nombre	Fórmula química	Tiempo de vida (años)	Potencial de calentamiento global		
			20 años	100 años	500 años
Comunes					
Dióxido de carbono	CO ₂	Variable	1	1	1
Metano	CH ₄	12	72	25	7.6
Óxido Nitroso	N ₂ O	114	289	298	153
Sustancias controladas por el protocolo de Montreal					
CFC-11	CCl ₃ F	45	6730	4750	1620
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	11000	10900	5200
CFC-13	CClF ₃	640	10800	14400	16400
CFC-113	CCl ₂ FCClF ₂	85	6540	6130	2700
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	300	8040	10000	8730
CFC-115	CClF ₂ CF ₃	1700	5310	7370	9990
Halón-1301	CBrF ₃	65	8480	7140	2760
Halón-1211	CBrClF ₂	16	4750	1890	575

Nombre	Fórmula química	Tiempo de vida (años)	Potencial de calentamiento global		
			20 años	100 años	500 años
Halón-2402	$\text{CBrF}_2\text{CBrF}_2$	20	3680	1640	503
Tetracloruro de carbono	CCl_4	26	2700	1400	435
Bromuro de metilo	CH_3Br	0.7	17	5	1
Metilcloroformo	CH_3CCl_3	5	506	146	45
HCFC-22	CHClF_2	12	5160	1810	549
HCFC-123	CHCl_2CF_3	1.3	273	77	24
HCFC-124	CHClFCF_3	5.8	2070	609	185
HCFC-141b	$\text{CH}_3\text{CCl}_2\text{F}$	9.3	2250	725	220
HCFC-142b	CH_3CCIF_2	17.9	5490	2310	705
HCFC-225ca	$\text{CHCl}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	1.9	429	122	37
HCFC-225 cb	$\text{CHClFCF}_2\text{CCIF}_2$	5.8	2030	595	181
Hidrofluorocarburos					
HFC-23	CHF_3	270	12000	14800	12200
HFC-32	CH_2F_2	4.9	2330	675	205
HFC-125	CHF_2CF_3	29	6350	3500	1100
HFC-134a	CH_2FCF_3	14	3830	1430	435
HFC-143a	CH_3CF_3	52	5890	4470	1590
HFC-152a	CH_3CHF_2	1.4	437	124	38
HFC-227ea	$\text{CF}_3\text{CHF}_2\text{CF}_3$	34.2	5310	3220	1040
HFC-236fa	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_3$	240	8100	9810	7660
HFC-145fa	$\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	7.6	3380	1030	314
HFC-365mfc	$\text{CH}_3\text{CF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	8.6	2520	794	241
HFC-43-10mee	$\text{CF}_3\text{CHFCH}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	15.9	4140	1640	500
Compuestos perfluorados					
Hexafluoruro de azufre	SF_6	3200	16300	22800	32600
Trifluoruro de nitrógeno	NF_3	740	12300	17200	20700
PFC-14	CF_4	50000	5210	7390	11200
PFC-116	C_2F_6	10000	8630	12200	18200
PFC-218	C_3F_8	2600	6310	8830	12500
PFC-318	$\text{c-C}_4\text{F}_8$	3200	7310	10300	14700
PFC-3-1-10	C_4F_{10}	2600	6330	8860	12500
PFC-4-1-12	C_5F_{12}	4100	6510	9160	13300
PFC-5-1-14	C_6F_{14}	3200	6600	9300	13300
PFC-9-1-18	$\text{C}_{10}\text{F}_{18}$	>1000	>5500	>7500	>9500
Pentafluoruro de trifluorometilsulfuro	SF_5CF_3	800	13200	17700	21200
Éteres fluorados					
HFE-125	CHF_2OCF_3	136	13800	14900	8490
HFE-134	$\text{CHF}_2\text{OCHF}_2$	26	12200	6320	1960
HFE-143a	CH_3OCF_3	4.3	2630	756	230
HFE-235da2	$\text{CHF}_2\text{OCHClCF}_3$	2.6	1230	350	106
HFE-245cb2	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CHF}_2$	5.1	2440	708	215
HFE-245fa2	$\text{CHF}_2\text{OCH}_2\text{CF}_3$	4.9	2280	659	200
HFE-254cb2	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CHF}_2$	2.6	1260	359	109
HFE-347mcc3	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	5.2	1980	575	175
HFE-347pcf2	$\text{CHF}_2\text{CF}_2\text{OCH}_2\text{CF}_3$	7.1	1900	580	175
HFE-356pcc3	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{CHF}_2$	0.33	386	110	33
HFE-449sl (HFE-7100)	$\text{C}_4\text{F}_9\text{OCH}_3$	3.8	1040	297	90
HFE-569sf2 (HFE-7200)	$\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$	0.77	207	59	18

Nombre	Fórmula química	Tiempo de vida (años)	Potencial de calentamiento global		
			20 años	100 años	500 años
HFE-43-10pccc124 (H-Galden-1040x)	CHF ₂ OCF ₂ OC ₂ F ₄ O CHF ₂	6.3	6320	1870	569
HFE-236ca12 (HG-10)	CHF ₂ OCF ₂ OCHF ₂	12.1	8000	2800	860
HFE-338pcc13 (HG-01)	CHF ₂ OCF ₂ CF ₂ OCH F ₂	6.2	5100	1500	460
Perfluoropolíéters					
PFPME	CF ₃ OCF(CF ₃)CF ₂ O CF ₂ OCF ₃	800	7620	10300	12400
Hidrocarburos y otros componentes con efectos directos					
Éter dimetilico	CH ₃ OCH ₃	0.015	1	1	<<1
Cloruro de metileno	CH ₂ Cl ₂	0.38	31	8.7	2.7
Clorometano	CH ₃ Cl	1.0	45	13	4

Fuente: IPCC (2007)

Responsabilidad: Actividades que generen emisiones de gases de efecto invernadero y por lo tanto tengan el potencial de contribución a los fenómenos de calentamiento global.

Recursos: Equipo de monitoreo de emisiones

Periodicidad: La evaluación del potencial debe partir de una base que corresponde a los niveles máximos de emisiones permitidas por sustancia, con monitoreo anual para verificar cumplimiento de los compromisos.

Nivel de referencia: Punto de generación de la actividad

Puntos de lectura: Puntos de emisión

54. Potencial de acidificación

Objetivo: Se basa en el cálculo de la contribución de SO_x, NO_x, HCl, NH₃ y NF y su potencial de formar iones de H⁺ en la atmósfera. Estas emisiones sufren una transformación química transformándose, por ejemplo, en ácido sulfúrico o nítrico, sulfato de amonio y nitrato de amonio, generando afectaciones en los ecosistemas susceptibles a la acidificación. Su dispersión es amplia y permanecen varios días en la atmósfera por lo que son transportados a largas distancias. Por esta razón es preciso controlar el proceso in situ a través de la contabilidad de las emisiones de estos gases (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2018)

Definición:

$$PA = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L e_{ap,j} \times B_{lj}$$

Donde:

PA: Potencial de acidificación
 $e_{ap,j}$: Potencial de acidificación del gas tipo j
 B_{lj} : Emisión de gas tipo j por producto l

Responsabilidad: Actividades que emitan sustancias con potencial de acidificación

Recursos: Sistemas de medición de gases y equipos de profesionales de química o ingeniería química para realización de pruebas y análisis.

Periodicidad: anual

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad

Puntos de lectura: Puntos de emisión de los gases con potencial de acidificación

55. Potencial de agotamiento de ozono

Objetivo: La capa de ozono u ozono estratosférico (O_3) es una capa que rodea el planeta y absorbe radiación ultravioleta mediante mecanismos de dispersión de gases y vapor de agua, protegiendo a los seres humanos de la radiación UV-A, UV-B, UV-C. En la Tabla 47 se describen las características de cada tipo de nivel de radiación (Romo-Gómez et al., 2019).

Tabla 47. Tipos de radiación en diferentes longitudes de onda

Tipo de radiación	Longitud de onda (λ)	Características
UV-C	<290 nm	Absorbido por la capa de ozono, no compatible con la vida en la tierra.
UV-B	290 - 320 nm	Principal causante de cáncer al penetrar la epidermis.
UV-A	230 - 400 nm	Menos dañina, se requieren grandes cantidades para penetrar la epidermis.
Visible Infrarroja	400 - 700 nm	Estimula la retina
	700 - 760 nm	Provoca calor

Fuente: Romo-Gómez et al. (2019)

La capa de ozono garantiza las condiciones de vida en el planeta, por lo tanto, su deterioro es de interés para los diferentes procesos y actividades. Este proceso de desgaste se genera por la presencia de óxidos nitrosos (NO_x), halocarburos, bromo y cloro, por el uso de clorofluorocarbonos – CFC sustancias que provienen de los sistemas de refrigeración, aire acondicionado, espumas y procesos químicos que generan radicales libres de Cl^* (Romo-Gómez et al., 2019). A partir de las cantidades emitidas de cada uno de estos compuestos o sustancia se calcula el Potencial de agotamiento de ozono o ODP por sus siglas en inglés (Ozone Depletion Potential).

El ODP se calcula teniendo como base al CFC-11, al cual se le asigna un valor de 1. Los halones tienen un ODP alto, debido a que un átomo de bromo es más efectivo que uno de cloro (45 veces más) en las reacciones de destrucción del ozono. Los ODP tienen en cuenta la vida media del compuesto y el número de átomos de ozono destruidos por molécula. En general, los gases con bajo ODP tienen tiempos de vida media bajos (IDEAM)¹⁰.

¹⁰ <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/94777476/EI+Ozono+-+Documento+t%C3%A9cnico+de+respaldo+a+la+informaci%C3%B3n+en+la+p%C3%A1gina+web+del+IDEAM+Febrero+2020/c3ec5e36-c2e0-414d-8e5c-9db5410dee7c?version=1.1>

Definición:

$$ODP = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L e_{odp,j} \times B_{lj}$$

Donde:

ODP : Potencial de agotamiento de ozono

B_{lj} : Emisión de la sustancia tipo j agotadora de la capa de ozono que se genera en la actividad por producto l

$e_{odp,j}$: Potencial de agotamiento de la capa de ozono del gas tipo j en relación con el CFC-11

Responsabilidad: Actividades que emitan sustancias con potencial de agotamiento de la capa de ozono.

Recursos: Equipo profesional para las mediciones y trabajo en laboratorio.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad.

Puntos de lectura: Puntos de emisión de los gases con potencial de agotamiento de la capa de carbono.

56. Índice de calidad del aire (ICA)

Objetivo: Este índice permite conocer los niveles de contaminación del aire identificando los niveles de concentración de seis sustancias principales: material particulado con diámetro inferior a 10 micras (PM_{10}), material particulado con diámetro inferior a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3) y monóxido de carbono (CO). La escala de valoración del índice se relaciona con la amenaza a la salud humana y se representa mediante una escala de color (Tabla 48) (Hernández, 2013).

Tabla 48. Interpretación del ICA

Rango ICA - escala de color	Descripción
$0 \leq ICA \leq 50$	Buena calidad del aire
$51 \leq ICA \leq 100$	Calidad del aire moderada
$101 \leq ICA \leq 150$	Calidad del aire dañina para la salud de grupos sensibles expuestos
$151 \leq ICA \leq 200$	Calidad del aire dañina para la salud de personas expuestas
$201 \leq ICA \leq 300$	Calidad del aire muy dañina para la salud
$301 \leq ICA \leq 500$	Calidad del aire peligrosa

Fuente: Hernández (2013).

Definición:

$$ICA_{Pjt} = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_{Pjt} - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

Donde:

ICA_{Pjt} : Índice de calidad del aire para la sustancia contaminante P de un sistema de calidad del aire j durante un tiempo t (de acuerdo con el periodo de exposición previsto en la norma) (Tabla 49).

C_{Pjt} : Concentración de la sustancia P en un sistema de vigilancia de calidad del aire j, en un periodo t.

BP_{Hi} : Punto de corte mayor o igual a la concentración medida del contaminante P (Tabla 49).

BP_{Lo} : Punto de corte menor o igual a la concentración medida del contaminante P (Tabla 49).

I_{Hi} : Valor del ICA correspondiente al punto de corte BP_{Hi} .

I_{Lo} : Valor del ICA correspondiente al punto de corte BP_{Lo} .

Tabla 49. Puntos de corte para el cálculo del ICA

Rangos ICA	O_3 8h (ppm)	O_3 1h (ppm) (1)	PM_{10} 24h (ppm)	$PM_{2.5}$ 24h (ppm)	CO 24h (ppm)	SO_2 24h (ppm)	NO_2 24h (ppm)
$0 \leq ICA \leq 50$	0.000 0.059	-	0 54	0.0 15.4	0.0 4.4	0.000 0.034	(2)
$51 \leq ICA \leq 100$	0.060 0.075	-	55 154	15.5 40.4	4.5 9.4	0.035 0.144	(2)
$101 \leq ICA \leq 150$	0.076 0.095	0.125 0.164	155 254	40.5 65.4	9.5 12.4	0.145 0.224	(2)
$151 \leq ICA \leq 200$	0.096 0.115	0.164 0.204	255 354	65.5 105.4	12.5 15.4	0.225 0.304	(2)
$201 \leq ICA \leq 300$	0.116 0.376 (0.155 0.404) (4)	0.205 0.404	355 424	150.5 250.4	15.5 250.4	0.305 0.604	0.65 1.24
$301 \leq ICA \leq 400$	(3)	0.405 0.504	425 504	250.5 350.4	250.5 350.4	0.605 0.804	1.25 1.64
$401 \leq ICA \leq 500$	(3)	0.505 0.604	505 604	350.5 500.4	350.5 500.4	0.805 1.004	1.65 2.04

Fuente: Hernández (2013). (1) Para O_3 el ICA resulta del promedio de exposiciones de 8 horas y 1 hora; (2) En NO_2 únicamente se tiene en cuenta valores de ICA sobre 200; (3) para el ozono, los valores de ICA superiores a 300 solo se dan en exposiciones de 1 hora; (4) los valores en paréntesis se dan para mediciones en concentraciones de 1 hora solo cuando se superponen.

Responsabilidad: Cuando la actividad o proyecto emita las sustancias contaminantes del índice y pueda generar un impacto acumulado, con otras actividades en la región de influencia del punto de medición.

Recursos: Información del IDEAM y las estaciones de monitoreo de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA).

Periodicidad: El cálculo del índice debe realizarse antes de iniciar la actividad, como medida preventiva y de decisión por parte de la autoridad ambiental y los proponentes; y de manera constante una vez se dé inicio al POA.

Nivel de referencia: Áreas de influencia de las estaciones de monitoreo.

Puntos de lectura: Estaciones de monitoreo de los SVCA.

57. Concentración de bifenilos policlorados (PCB)

Objetivo: Los bifenilos policlorados son una familia con más de 200 compuestos formados por cloro, carbono e hidrógeno, que se encuentran catalogados dentro de los *Contaminantes Orgánicos Persistentes* (COP) más tóxicos para los seres vivos. Por su comportamiento acumulativo se transfieren en las redes tróficas aumenta su concentración con el transcurso del tiempo. Cuando llega a los seres humanos, afecta a los sistemas endocrino, inmunológico y nervioso, entre otros (Miller-Pérez et al., 2009).

El transporte atmosférico es uno de los principales vehículos de los PCB y, por lo tanto, su monitoreo permite identificar el impacto de fuentes locales y sus rangos de transporte (Proyecto CERI-ACDI Colombia, 1999).

Definición:

$$[PCB] = \frac{MPCB}{VAF}$$

Donde:

$[PCB]$: Concentración de PCB en el aire

$MPCB$: Masa de PCB en el filtro de absorción

VAF : Volumen de aire filtrado

Para tomar las muestras se emplea un mecanismo de absorción de aire (controlando su volumen) con un filtro específico para PCB con el cual se pueda determinar su masa (Proyecto CERI-ACDI Colombia, 1999). El resultado puede ser contrastado con la Tabla 50 en donde se presentan los promedios máximos de exposición permisibles en términos de protección de la salud humana (Proyecto CERI-ACDI Colombia, 1999).

Tabla 50. Límites de exposición a los PCBs

Concentración promedio	Periodo
35 ng/cm ³	Anual
150 ng/cm ³	24 horas
450 ng/cm ³	0.5 horas

Fuente: Proyecto CERI-ACDI Colombia (1999)

Responsabilidad: Actividades con potencial de generación de PCB dentro del ciclo de vida de sus procesos.

Recursos: Equipos de profesionales en química y/o ingeniería química, equipos de medición y laboratorios.

Periodicidad: Mensual

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad

Puntos de lectura: Puntos de emisión o equipos con PCB

58. Concentración de compuestos orgánicos volátiles (COV)

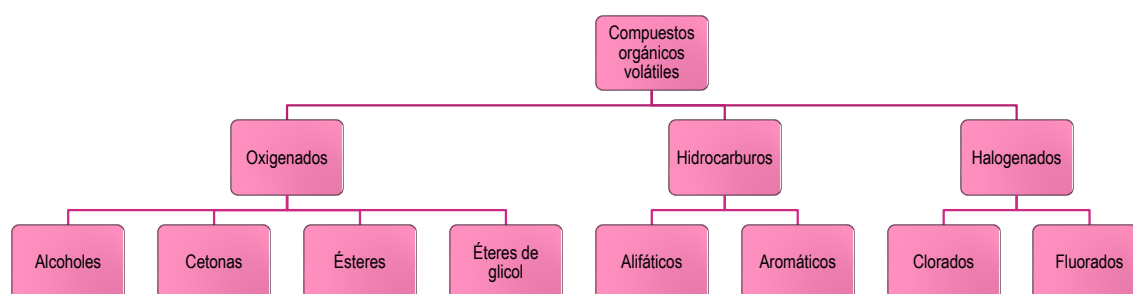
Objetivo: Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son sustancias constituidas por carbono que cuentan con facilidad para pasar a un estado gaseoso, debido a que presentan una presión de vapor igual o mayor a 0.01 kPa a 20°C y pueden ser tanto de origen natural como antrópico. Son contaminantes primarios que al reaccionar

con elementos de la atmósfera en conjunto con la luz solar, pueden generar contaminantes secundarios como el ozono troposférico, derivados bencílicos, entre otros con efectos incluso mayores (A. Moreno, 2016).

Los COV de origen biogénico son en su mayoría hidrocarburos, pero también se emiten en proporciones mucho menores de COV parcialmente oxidados como alcoholes, aldehídos, cetonas y ácidos (Altamirano & Meneses, 2018; A. Moreno, 2016). Dentro de los COV, el metano (hidrocarburo alifático) es el más abundante, cuya concentración en la atmósfera ha ido en aumento desde la revolución industrial -lo que da cuenta de la influencia antropogénica-. Los demás hidrocarburos dentro del grupo de COV son denominados hidrocarburos no metánicos (NMHC – por sus siglas en inglés) (A. Moreno, 2016).

Dentro de los COV se destacan los clorofluorocarbonos (CFC), uno de los principales responsables de la pérdida de la capa de ozono (cuyo uso fue prohibido en el protocolo de Montreal); y los BTEX¹¹, hidrocarburos aromáticos presentes en la producción y ciclo de vida de los hidrocarburos, altamente contaminantes y asociados a enfermedades como en cáncer, por lo tanto su presencia es altamente peligrosa (Altamirano & Meneses, 2018; A. Moreno, 2016; Sbarato & Rubio, 2018). En la Figura 8 se presente una clasificación general de los COV.

Figura 8. Clasificación general de los Compuestos Orgánicos Volátiles



Fuente: elaboración propia a partir de Coava Pérez & Tovar González (2011)

Definición:

$$[COV_i] = \frac{Q_i \times L}{D \times A \times t} = \frac{Q_i}{S \times t}$$

Donde:

$[COV_i]$: Concentración del compuesto orgánico volátil tipo i

Q_i : Cantidad absorbida del COV tipo i

L : Ruta de difusión a través del absorbente (cm)

D : Coeficiente de difusión (cm²/s)

A : Sección transversal del tubo (cm²)

t : Tiempo de exposición (s)

S : Coeficiente de captación, o velocidad de captación del contaminante (según las características del aparato de captación) (cm³/s).

¹¹ benceno, tolueno, etilbenceno, xileno

En la Tabla 51 se muestran estos coeficientes para el caso de los BTEX.

Tabla 51. Coeficientes de captación para BTEX

Compuesto	Coeficiente de captación (cm ³ /s)
Benceno	6.44
Tolueno	5.72
Etilbenceno	5.03
m,p-xileno	5.03
o-xileno	5.03

Fuente: Díaz Poveda (2019)

Su medición se soporta en la Ley de Fick, haciendo circular aire a través de un muestreador tubular con un extremo abierto y el otro con una superficie de absorción (de diferente afinidad de acuerdo con los compuestos a monitorear), que es expuesta por un tiempo que va desde algunos minutos a un mes. Luego de la toma de la muestra, ésta es extraída y posteriormente analizada por cromatografía de gases (Díaz Poveda, 2019). En la legislación colombiana se encuentran límites para la exposición humana para algunos de estos compuestos, en especial los que son considerados de alto riesgo para la salud (Tabla 52).

Tabla 52. Niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire (COV)

Contaminante	Nivel máximo permisible de exposición (µg/m ³)	Tiempo de exposición
Benceno	5	Anual
Tolueno	260	1 semana
	1000	30 minutos
Hidrocarburos aromáticos policíclicos expresados como Benzo (a) pireno	0.001	Anual

Fuente: Resolución 2254 de 2017

Responsabilidad: Actividades que dentro de sus procesos puedan generar emisiones de alguno de los compuestos orgánicos volátiles.

Recursos: Insumos químicos y profesionales (ingenieros químicos) para el manejo de sistemas de absorción de las muestras de aire y los laboratorios de análisis.

Periodicidad: Mensual.

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad.

Puntos de lectura: Puntos de emisión.

59. Concentración de metales pesados

Objetivo: Dentro del material particulado se transportan metales pesados, con una alta capacidad de asociación a las masas de aire. Estos son generados por procesos de combustión de combustibles fósiles y diferentes procesos industriales como la producción de cloro, la volatilización de fusiones metálicas, el uso de

pinturas, entre otros. Si bien se conocen 27 metales pesados con características tóxicas, los que tienen mayor incidencia en la atmósfera y por lo tanto representan fuentes de contaminación son mercurio (Hg), níquel (Ni), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), berilio (Be) y antimonio (Sb) ¹² (Machado et al., 2008; Velasco, 2005).

Definición:

$$[MP_i] = \frac{WMP_i}{VAF}$$

Donde:

$[MP_i]$: Concentración del metal pesado tipo i.

WMP_i : Masa del metal pesado tipo i encontrado en la muestra de material particulado filtrada.

VAF : Volumen de aire filtrado en un proceso de muestreo durante 24 horas, teniendo en cuenta el caudal de aire y el volumen del compartimiento de absorción de la muestra.

La legislación colombiana ha establecido algunos niveles permisibles de exposición a sustancias tóxicas, dentro de las que se encuentran metales pesados (Tabla 53).

Tabla 53. Niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire (Metales pesados)

Contaminante	Nivel máximo permisible de exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
Plomo y sus compuestos	0.5	Anual
Cadmio	1	Anual
Mercurio Inorgánico (vapores)	1	Anual
Níquel y sus compuestos	0.180	Anual

Fuente: Resolución 2254 de 2017

Responsabilidad: Actividades que involucren procesos de combustión de fuentes fósiles o cuyos procesos impliquen el uso y/o emisión de metales pesados en el aire.

Recursos: Equipo de filtración de partículas y laboratorio de análisis para determinar las concentraciones de las muestras.

Periodicidad: Mensual

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad

Puntos de lectura: Puntos de emisiones

60. Concentración de elementos radiactivos de origen natural

Objetivo: La presencia de materiales radiactivos de origen natural en la corteza terrestre es causante de contaminación atmosférica. Una de sus fuentes es la desintegración de las cadenas de uranio, radio y torio.

¹² En ocasiones se incluyen sustancias como el berilio, un metal ligero, y el antimonio dentro de los listados de metales pesados debido a su alta toxicidad.

Dentro de la cadena de desintegración se encuentra el radón₂₂₂ (Rn₂₂₂) que se difunde en el aire y tiene una vida de 3.8 días. Su presencia es más intensa en regiones con actividad sísmica o en dónde se realizan actividades que interfieran en el subsuelo. Dentro de sus fuentes están los pozos de agua subterránea, los esquistos aluminosos, la infiltración desde el suelo (fuente más importante de radón en interiores), entre otras (OMS, 2015; Pérez & López, 2014).

La presencia de radón₂₂₂ es especialmente preocupante en interiores, debido a la infiltración del gas a través del suelo, y en minas. Las exposiciones a radón suelen medirse como una medida de concentración de gas en el aire, en unidades de becquerelio¹³ por metro cúbico (Bq/m³) (OMS, 2015).

Definición:

$$C_{Rn} = \frac{\rho}{K_{Rn} \times T}$$

Donde:

- C_{Rn} : Concentración de radón en el lugar estudiado
- ρ : Densidad de huellas o trazas por unidad de área. Esta densidad es verificada en un material sólido dieléctrico que cuando las partículas alfa lo chocan forman una suerte de huella. Estas pueden ser revisadas con un baño químico del material de incidencia y las trazas se hacen perceptibles ante un lente de un microscopio óptico, en una técnica denominada microscopía (Pérez & López, 2014).
- K_{Rn} : Factor de calibración, que es obtenido a partir de exposiciones controladas en un centro de calibración (OMS, 2015)
- T : Cantidad de días expuestos a cada detector.

Aunque concentraciones del orden de 200 Bq/m³ o superiores suponen la necesidad de que las autoridades tomen medidas, incluso niveles inferiores pueden significar riesgos para la salud. Por lo tanto la OMS (2015) define a un valor de 100 Bq/m³ como valor de referencia para minimizar riesgos en la salud de las personas expuestas.

Responsabilidad: Actividades que incidan en fuentes potenciales de Radón₂₂₂ como rocas tanto en superficie como en el subsuelo y fuentes de agua subterránea, entre otros. Las autoridades deben hacer seguimiento a partir de valores ambientales previos a la realización de la actividad, para luego definir una estrategia de medición en las zonas circundantes, para definir si se han presentado cambios en las concentraciones del gas y en este sentido tomar medidas.

Recursos: Una medición de la concentración de Rn₂₂₂ debe darse con métodos de largo alcance en los que la incertidumbre de medición sea menor e incluya las posibles variaciones asociadas a la ventilación del recinto (mina, interior, etc.), así como las meteorológicas y estacionales que puedan influir en la concentración del gas.

Periodicidad: Para una medición que considere las variaciones propias de las concentraciones del gas influenciadas por formas de ventilación de los recintos, así como condiciones meteorológicas, entre otras, se debe hacer mediciones con dispositivos integrados que permitan recolectar mediciones continuas. Estas deben ser monitoreadas para identificar las dinámicas anuales de concentración del gas. En el caso de las zonas

¹³ Un becquerelio corresponde a una desintegración por segundo (OMS, 2015).

circundantes, se deben colocar los dispositivos en diferentes radios alrededor de la actividad para verificar la incidencia de esta en relación a su área de influencia.

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Recintos asociados a la actividad (minas e instalaciones en el sitio) y puntos clave dentro del área de influencia de la actividad.

Emisión de sustancias radiactivas

Los campos electromagnéticos, el sol y fuentes terrestres asociadas a diferentes tecnologías generan diferentes niveles de radiación electromagnética (REM). Debido a su naturaleza ondulatoria, pueden ser caracterizados según su frecuencia que es medida en Hertz (Hz), donde aquellas con niveles menores a 10^{15} Hz son radiación no ionizante y las superiores a este nivel son ionizantes (caracterizadas por tener la capacidad de romper enlaces de moléculas cuando interactúan con la materia) (Menéndez & García, 2013; Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2012).

61. Radiación no ionizante

Objetivo: Las radiaciones no ionizantes están presentes en diferentes formas en la cotidianeidad, encontrándose en la industria de las telecomunicaciones, ciertos aparatos eléctricos, en usos industriales específicos y radares. Dependiendo de la frecuencia se dividen en: baja frecuencia (0.03 – 0.3 MHz), media frecuencia (0.3 – 3 MHz), alta frecuencia (3 – 30 MHz), muy alta frecuencia (30 – 300 MHz) y supra alta frecuencia (3 – 30 GHz). Si bien el nivel de energía generado por este tipo de radiación no tiene efectos en la desintegración de las moléculas de las células, sus efectos se asocian al calentamiento y la inducción de corrientes eléctricas en los tejidos y en la célula, lo que también puede generar efectos adversos para la salud (Guerrero Abreu & Perez Alejo, 2006).

En la Tabla 54 se muestran diferentes niveles de radiación no ionizantes asociados a los diferentes servicios e industrias.

Tabla 54. Rangos de frecuencias de radiaciones no ionizantes y clasificación por tipo de servicios

Rango de frecuencias	Banda	Descripción	Longitud de onda	Tipos de servicios
30-300 KHz	LF	Frecuencias Bajas	10-1 Km	Radio de Onda Larga, Transmisores de LF
300-3000 KHz	MF	Frecuencias Medias	1-0.1 Km	Radio AM, radio navegación
3-30 MHz	HF	Frecuencias Altas	0.1-0.01 Km	Radio CB, Aficionados, Comunicaciones de Radio HF
30-300 MHz	VHF	Muy Altas Frecuencias	0.01-0.001 Km	Radio FM, TV VHF, Servicios de Emergencias, Aficionados
300-3000 MHz	UHF	Ultra Altas Frecuencias	0.001-0.0001 Km	Radio FM, TV VHF, Servicios de Emergencias, Aficionados
3-30 GHz	SHF	Super Altas Frecuencias	0.0001-0.00001 Km	Microondas, comunicaciones satelitales, radar, microondas punto a punto
30-300 GHz	EHF	Extremadamente Altas Frecuencias	0.00001-0.000001 Km	Radar, radio, astronomía, enlaces de microondas cortas

Fuente: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2012)

Definición: Para establecer los niveles de exposición a la radiación electromagnética no ionizante, se parte de unos rangos de frecuencia medidos en Hz, sobre los que se establecen restricciones en términos de la intensidad del campo eléctrico E (V/m), intensidad del campo magnético B(A/m) y la densidad de la potencia de onda plana equivalente S (W/m²).

En la Tabla 55 se muestran las restricciones de exposición en el Decreto 195 de 2005, donde se divide entre los tipos de exposición entre operarios, de quienes se estima que a pesar de estar ante unos niveles de exposición mayor, tienen condiciones de salud y seguridad en el trabajo que minimiza el efecto. Por su parte, el público en general corren riesgos que no pueden ser controlados individualmente por lo que los niveles de exposición se limitan a un quinto de los aceptados para la exposición ocupacional (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2012).

Tabla 55. Límites máximos de exposición según frecuencia de operación del emisor de servicios de telecomunicación hasta 300 GHz

Tipo de exposición	Gama de frecuencia (f)	Intensidad del campo eléctrico E (V/m)	Intensidad del campo magnético B (A/m)	Densidad de potencia de onda plana equivalente S (W/m ²)
Ocupacional	9 - 65 KHz	610	24.4	-
	0.065 - 1 MHz	610	1.6/ f	-
	1 - 10 MHz	610 / f	1.6/ f	-
	10 - 400 MHz	61	0.16	10
	400 - 2000 MHz	3 f	0.008 f ^½	f/40
	2 - 300 GHz	137	0.36	50
Público en general	9 - 150 KHz	87	5	-
	0.15 - 1 MHz	87	0.73 / f	-
	1 - 10 MHz	87 / f ^½	0.73 / f	-
	10 - 400 MHz	28	0.073	2
	400 - 2000 MHz	1375 f ^½	0.00037 f ^½	f/200
	2 - 300 GHz	61	0.16	10

Fuente: Decreto 195 de 2004

Responsabilidad: Actividades cuya operación implique la generación de radiación electromagnética no – ionizante (especialmente las telecomunicaciones)

Recursos: Equipos de medición

Periodicidad: Medición continúa

Nivel de referencia: Área de influencia expuesta a los campos electromagnéticos generados por la actividad

Puntos de lectura: Radio de alcance de los campos electromagnéticos

62. Radiación ionizante

Objetivo: Cuando la radiación ionizante interactúa con la materia puede provocar ionización o la generación de partículas con carga eléctrica (iones). La fuente de esta radiación puede partir de partículas subatómicas o por causa de radiación electromagnética -rayos X y rayos gamma γ - de alta frecuencia.

Los tipos de radiación ionizante son: alfa (α), con alta energía y baja capacidad de penetración; beta negativa (β^-) que surgen como consecuencia de la transformación de un neutrón en un protón y un electrón; beta positiva (β^+), como la emisión de un positrón; de neutrones, como la emisión de partículas sin carga, de alta energía y capacidad de penetración; gamma (γ), proceden del núcleo del átomo, con menor nivel de energía que las radiaciones α y β , pero con mayor capacidad de absorción; y los rayos X, de naturaleza electromagnética (Menéndez & García, 2013).

Su capacidad de interacción y modificación de las condiciones de la materia la hacen de especial interés por los efectos que puedan tener en la salud, y se mide en límites permisibles de exposición (Menéndez & García, 2013). Las limitaciones a los niveles de radiación dependen de la dosis absorbida potencial. Esta es una cantidad de energía cedida y, especialmente, absorbida. Se mide a través de dosis equivalente, que pondera diferentes fuentes y rangos de energía de radiación no ionizante en tejidos vivos (Menéndez & García, 2013).

Definición:

$$H_{t,r} = w_r \times D_{tr}$$

Donde:

$H_{t,r}$: Dosis equivalente medida en Sievert (Sv)

w_r : Ponderación por tipo de fuente de radiación y rango de energía definido (Tabla 56)

D_{tr} : Dosis absorbida

Tabla 56. Valores del factor de ponderación de la radiación w_r

Tipo de fuente de radiación	Rango de energía	w_r
Fotones	Todos los niveles de energía	1
Electrones y muones	Todos los niveles de energía	1
Neutrones	< 10 keV	5
	10 keV – 100 keV	10
	100 keV – MeV	20
	2 MeV – 20 MeV	10
	>20 MeV	5
Protones (excepto los de retroceso)	> 2 MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fisión, núcleos pesados	Todos los niveles de energía	20

Fuente: Menéndez & García (2013).

Las limitaciones de exposición y absorción de la dosis efectiva dependen del tipo de persona expuesta de acuerdo con la Tabla 57.

Tabla 57. Límites de dosis según persona expuesta y tiempo de exposición

Personas expuestas	Valor
Trabajadores	100 mSv/5 años oficiales consecutivos, máximo 50 mSv cualquier año oficial
Aprendices y estudiantes	6 mSv/año
Personas no profesionalmente expuestas	1mSv/año
Mujeres embarazadas (feto)	Improbable superar 1 mSv/embarazo
Lactantes	No debe haber riesgo de contaminación radiactiva

Fuente: Menéndez & García (2013).

Responsabilidad: Actividades que generen cualquier tipo de radiación no ionizante.

Recursos: Equipos de medición de fuentes radiactivas

Periodicidad: Constante

Nivel de referencia: Lugar de la actividad

Puntos de lectura: Equipos con radiactividad

63. Número de personas potencialmente afectadas por la contaminación atmosférica

Objetivo: Para definir el número de personas potencialmente afectadas por diferentes niveles de contaminación atmosférica, se parte de la identificación de las sustancias emitidas por la actividad y la caracterización de sus concentraciones y la interpretación de su dispersión en relación con las condiciones meteorológicas de la zona en donde se encuentra la fuente de emisión y el estado actual de las sustancias contaminantes en el aire, dentro del área de influencia (Astudillo Romero, 2012).

Para el análisis se considera tanto el estado de la fuente como el del área de influencia. En el primer caso, se evalúa el proceso (materias primas, productos, subproductos, consumos, producciones), la existencia de chimeneas (altura y diámetro), gases y sustancias contaminantes emitidas (caudales, temperatura y humedad), y fuentes móviles asociadas al desarrollo de la actividad (cantidad, rutas, contaminantes emitidos). Con respecto a la información del área de estudio, el análisis se centra en la caracterización de la información meteorológica con la medición de variables como las condiciones de estabilidad, las capas de inversión, el régimen de vientos, la humedad relativa, la temperatura, la insolación, la precipitación, la nubosidad, entre otras (Astudillo Romero, 2012).

A partir de esta caracterización se puede generar un modelo de dispersión que redunde en información espacial que categorice los niveles de concentración de contaminantes en el espacio. Esta información es la base para generar información sobre la población potencialmente afectada por la contaminación atmosférica, por lo que se requiere de información demográfica del área de estudio.

Definición:

$$PAC_j = \sum_{i=1}^n PAC_{ij}$$

Donde:

PAC_j : Número de personas afectadas por el contaminante tipo j.

PAC_{ij} : Número de personas afectadas por el contaminante tipo j en la zona tipo i en el área de influencia del componente atmosférico.

Responsabilidad: Actividades que generen emisiones de diferentes sustancias contaminantes a la atmósfera tanto de fuentes móviles como fijas.

Recursos: Instrumentos y equipos de medición y monitoreo de emisiones, información de base sobre la calidad del aire (esta puede ser de fuentes oficiales en el caso de que tal monitoreo exista o con levantamientos preliminares de la actividad).

Periodicidad: Debe realizarse una caracterización inicial en la que se considere el estado actual de las emisiones y la población potencialmente afectada, y luego de iniciada la actividad deben hacerse renovación del análisis dos veces al año en las temporadas seca y lluviosa.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Mediciones en campo, información oficial de puntos de monitoreo y demografía local, y análisis espacial en SIG.

64. Niveles de olores ofensivos

Objetivo: El olor es una propiedad organoléptica que permite percibir sensaciones a partir del órgano olfativo de sustancias volátiles, cuyas características son: intensidad, o fuerza de la sensación percibida; calidad, entendido como el carácter diferenciador del olor; aceptabilidad, que denota el nivel de gusto o disgusto que causa el olor; y umbral del olor, como la concentración mínima en la que el estímulo odorífico puede generar una respuesta (Organización Panamericana de la Salud & Ministerio de Salud, 2012).

En ese sentido, el olor se convierte en ofensivo cuando por sus características organolépticas, concentración, calidad y duración devienen en efectos desagradables e inaceptables para el receptor. Su origen puede ser de fuentes puntuales (chimeneas, conductos, salidas de ventilación) o difusas (superficies sólidas o líquidas como pozos de secado de lodos, plantas de compostaje, vertederos, piscinas, biofiltros, etc.). En la Tabla 58 se presentan diferentes sustancias que generan olores ofensivos relacionadas con algunas de las actividades que los genera (Organización Panamericana de la Salud & Ministerio de Salud, 2012).

Tabla 58. Actividades que generan olores ofensivos y sustancias asociadas

Actividad	Ácido Sulfídrico	Sulfuro de dimetilo	Dicloruro de azufre	Mercaptanos	Amoníaco	Metilamina	Acetaldehído	Ácido Butírico	Etilacrilato	Clorofenol	Estireno	Trimetilamina	Indole	Skatole
Plantas de tratamiento de agua residual	X	X	X	X	X	X						X	X	X
Rellenos sanitarios y sitios de disposición de residuos	X	X	X	X	X	X						X	X	X
Cría y sacrificio de animales	X	X	X	X	X	X						X	X	X

Actividad	Ácido Sulfúrico	Sulfuro de dimetilo	Dicloruro de azufre	Mercaptanos	Amoníaco	Metilamina	Acetaldehído	Ácido Butírico	Etilacrilato	Clorofenol	Estireno	Trimetilamina	Indole	Skatole
Industria de procesamiento de pescado y sus derivados (harina, aceites, concentrados)												X		
Industrias de procesamiento de cueros (curtiembres)	X	X	X		X	X						X	X	X
Industrias de subproductos de origen animal y vegetal	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X
Industria petroquímica y de explotación de gas natural	X	X	X	X										
Industria de pulpas de madera y fabricación de papel, cartón, celulosa	X	X	X	X										
Elaboración de productos lácteos							X	X						
Elaboración de productos de café							X							X
Elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal y sus derivados	X	X	X	X	X	X		X				X	X	X
Fabricación de resinas sintéticas y adhesivos									X					
Fabricación de antisépticos y plaguicidas												X		
Fabricación de plásticos y cauchos	X	X	X								X			
Fabricación de abonos y compuestos orgánicos nitrogenados					X	X						X	X	X

Fuente: Organización Panamericana de la Salud & Ministerio de Salud (2012).

La medición de olores ofensivos puede hacerse a partir del olfato humano como sensor del olor o a partir de técnicas analíticas que identifican cuantitativamente las sustancias químicas presentes en un olor. En estos casos, la evaluación se realiza a través de la identificación de umbrales de olor o la mínima concentración de una sustancia sobre la cual se genera la sensación (Organización Panamericana de la Salud & Ministerio de Salud, 2012).

Definición:

$$[CSO_i] = \frac{MSO_i}{VA}$$

Donde:

$[CSO_i]$: Concentración con sustancia i que puede generar olor ofensivo

MSO_i : Masa de la sustancia tipo i que puede generar olores ofensivos

VA : Volumen de aire de la muestra

En la Tabla 59 se muestran los límites de estas concentraciones y el umbral de percepción del olor para diferentes sustancias.

Tabla 59. Umbrales de percepción del olor y nivel máximo de concentración permisible de sustancias que generan olores ofensivos

Grupo		Nombre de la sustancia	Umbral de percepción del olor ppm	Nivel máximo de concentración permisible para el aire exterior (Resolución 610 de 2010)
Líquidos y gases inorgánicos y compuestos de azufre reducido S ⁻²	Sulfuros	Sulfuro de hidrógeno	0.0081	7.0 µg/m³ (0.005 ppm)
		Sulfuro de dimetilo	0.011	5.0 µg/m³ (0.0019 ppm)
		Dicloruro de azufre		4.2 µg/m³ (0.0015 ppm)
	Mercaptanos	Metilmercaptano	0.0016	4.0 µg/m³ (0.002 ppm)
		Etil mercaptano	0.00076	0.5 µg/m³ (0.0002 ppm)
		Propil mercaptano, n-propil mercaptano o n-propanotiol		22 µg/m³ (0.007 ppm)
		Butil mercaptano, n-butil mercaptano o n-butanotiol	0.01	3.0 µg/m³ (0.0008 ppm)
	Gases derivados del nitrógeno	Amoniac	5.2	35 µg/m³ (0.036 ppm)
		Monometilamina	0.021	27 µg/m³ (0.011 ppm)
Ácidos orgánicos y derivados		Acetaldehído o etanal	0.05	380 µg/m³ (0.683 ppm)
		Ácido butírico, ácido n-butanóico, ácido etil acético o ácido propanocarbocílico	0.001	4.0 µg/m³ (0.014 ppm)
		Etil acrilato	0.0012	2.0 µg/m³ (0.008 ppm)
Compuestos aromáticos y derivados		Clorofenol		0.1 µg/m³ (0.0005 ppm)
		Estireno, vinilbenceno, etenilbenceno, cinameno o feniletileno	0.32	200 µg/m³ (0.047 ppm)
		Nitrobenceno	0.018	24 µg/m³ (0.009 ppm)

Fuente: Organización Panamericana de la Salud & Ministerio de Salud (2012)

Responsabilidad: Es responsabilidad de la actividad que por cuyas características emita y/o utilice sustancias que puedan generar potencialmente olores ofensivos. Asimismo, las autoridades ambientales deben hacer monitoreo de las condiciones del olor para contrastar con las medidas de manejo y compromisos de la actividad para disminuir el nivel de impacto.

Recursos: Equipo profesional para el trabajo en campo.

Periodicidad: Definición de línea base en términos de intensidad, duración, intensidad y frecuencia y a partir de esto contrastar los cambios en términos de estos parámetros semestralmente.

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: En el lugar de la actividad y en diferentes radios alrededor de la zona de influencia.

65. Niveles de presión sonora

Objetivo: El ruido es un sonido transmitido por ondas sonoras cuyo principal canal de transmisión es el aire, pero por su intensidad no es asimilada agradablemente por el oído y el cerebro del receptor, y puede significar riesgos en la salud de quienes estén expuestos. A diferencia del sonido, cuyas vibraciones suceden con una frecuencia regular y agradable, las frecuencias del ruido son irregulares y de alta intensidad (Chaparro & Linares, 2017). La medición del ruido refiere a medidas de presión sonora, que determinan la intensidad de sonido de las fuentes emisoras de ruido, donde el espectro audible varía entre 0 dB y 120 dB (Chaparro & Linares, 2017).

Definición:

$$NPS = 20 \times \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)$$

Donde:

NPS: Nivel de presión sonora medida en decibeles (dB).

P: Presión sonora registrada (μPa)

P_{ref}: Presión de referencia a la presión de un tono audible ($20 \mu Pa$)

Los niveles de ruido se miden en decibeles (dB) y los niveles permisibles dependen de la normativa. En la Tabla 60 se muestran los estándares máximos de ruido permitidos por tipo de sector y horario, definido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Casas-García, Betancur-Vargas, & Montaña-Erazo, 2015).

Tabla 60. Estándares máximos permisibles de ruido por horario y tipo de sector

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en dB(A)	
		Día	Noche
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	50
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes.	65	55
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación.		
	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre.		
Sector C. Ruido Intermedio Restringido	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	75
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios,	70	60

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en dB(A)	
		Día	Noche
	restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.		
	Zonas con usos permitidos de oficinas.	65	55
	Zonas con usos institucionales.		
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre.	80	75
Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Residencial suburbana.	55	50
	Rural habitada destinada a explotación agropecuaria.		
	Zonas de Recreación y descanso, como parques y reservas naturales.		

Fuente: Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2006)

Responsabilidad: Actividades cuyos procesos impliquen la emisión de ruido con el potencial de sobrepasar los límites máximos permisibles. Estas deben monitorear continuamente los niveles de manera que no sobrepase los estándares definidos por la legislación nacional. Asimismo, las autoridades ambientales deben hacer monitoreos periódicos para comprobar el cumplimiento de los compromisos asumidos en los procesos de licenciamiento y trámite de permisos.

Recursos: Equipos de medición de niveles de ruido.

Periodicidad: Diaria con mediciones diurnas y nocturnas.

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad

Puntos de lectura: Zona de la actividad en donde se genera las emisiones de ruido de acuerdo con lo establecido por la AA, para el POA.

66. Densidad del número de fuentes de ruido presentes en el área

Objetivo: Este indicador busca establecer la densidad de la intensidad del ruido en el área de influencia en donde tendría lugar el proyecto. Para ello, debe identificarse espacialmente las principales fuentes de ruido en la zona de estudio y realizar las mediciones de intensidad para las mismas. A partir de la georeferenciación y medición es posible elaborar mapas para estimar la influencia de las fuentes de ruido a través de procesos de interpolación.

Definición:

$$DFRA = \frac{NFR}{A}$$

Donde:

DFRA: Densidad de fuentes de ruido presentes en el área

NFR: Número de fuentes de ruido

A: Área de influencia

Responsabilidad: Actividad con potencial de generación de ruido

Recursos: Sistemas de medición de intensidad del sonido y sistemas de georreferenciación

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Puntos de concentración del ruido en el área de influencia

67. Número de personas afectadas por ruido

Objetivo

A partir de la definición de mapas de ruido, producto de muestreos y geolocalización de las fuentes, se define el número de personas afectadas. El mapa, genera información espacial que define tanto las áreas afectadas por el ruido como los niveles de ruido que afectan estas zonas, lo que aunado con información de la población en las áreas del mapa permite el conocimiento del número de personas afectadas. La medición debe realizarse a partir de una medida preliminar sin la actividad, y, posteriormente, realizar el contraste con una estimación la influencia de los niveles de ruido asociados a la inclusión de posibles nuevas fuentes generadas por la actividad.

Definición:

$$PAR_j = \sum_{i=1}^n PAR_{ij}$$

Donde:

PAR_j : Número de personas afectadas por ruido de intensidad j

PAR_{ij} : Número de personas afectadas por ruido de intensidad j en la zona tipo i del mapa de ruido.

Responsabilidad: Actividades que puedan generar ruido en la realización de sus operaciones

Recursos: Equipos de medición de la presión sonora, equipos de georreferenciación, sistemas de información geográfica e información demográfica.

Periodicidad: Debe realizarse una medición preliminar antes de iniciada la actividad y luego deben realizarse actualizaciones de los mapas anualmente y cuando la actividad incluya nuevas fuentes de ruido.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Mediciones en campo y análisis espacial en SIG

68. Indicador de vibraciones

Objetivo: Las vibraciones son movimientos oscilatorios y periódicos en un sistema elástico entorno a un punto de equilibrio en función del tiempo. Estas tienen diferentes efectos en el cuerpo humano, generalmente

asociadas con actividades de transporte e industriales que impliquen el manejo de maquinaria pesada (Arias-Castro & Martínez-Oropesa, 2016; Griffin, 2012).

Definición:

$$NV_i = fV_i$$

Donde:

NV_i : Nivel de vibración de la fuente tipo i.

fV_i : Frecuencia de la fuente tipo i.

La interpretación de los resultados de los niveles de presión en relación con los efectos en el cuerpo humano se muestra en la Tabla 61.

Tabla 61. Efectos de diferentes niveles de vibración en el cuerpo humano

Frecuencia de vibración	Efectos
<1Hz	Mareos
3.5 – 6.0 Hz	Efecto de alerta
4.0 – 10 Hz	Dolor en el pecho y el abdomen
Cercano a 5 Hz	Reducción de motricidad manual
7.0 – 20 Hz	Problemas de comunicación
8.0 – 10 Hz	Dolor de espalda
10 – 20 Hz	Dolor en el intestino y la vejiga
10 – 30 Hz	Reduce la capacidad para el control manual y visual
10 – 90 Hz	Reduce la capacidad para las acciones visuales

Responsabilidad: Actividades que puedan generar niveles de vibración, que afecten la salud durante sus operaciones.

Recursos: Equipos de medición de la vibración.

Periodicidad: Mensual.

Nivel de referencia: Área de influencia.

Puntos de lectura: Mediciones en campo.

MEDIO BIÓTICO

Componente ecosistemas terrestres

69. Área basal de cada especie (AB)

Objetivo: Permite estimar el espacio real ocupado por los troncos de cada especie y a partir de análisis comparativos, reconocer la dominancia de cada una de las especies dentro del rodal y el estado de desarrollo del bosque (INVEMAR - ANH, 2013).

Definición: Para calcular el área basal de cada especie puede utilizarse el método de Cuadrantes Centrados en Puntos (PCQM, por sus siglas en inglés) como estrategia de parcelación. En este método se indican puntos centrales de muestreo a lo largo de un transepto y las distancias entre estos y los árboles más cercanos en cada cuadrante formado. El cálculo es el siguiente:

$$AB_{m^2/0.1ha} = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^n DAP_i^2}{4 \times 10000} \right)}{CCE} \times D_{(0.1 ha)}$$

Si el método de monitoreo es de Parcelas Permanentes de Crecimiento (PPC), el cálculo es el siguiente:

$$AB_{m^2/0.1ha} = \frac{\sum_{i=1}^n DAP_i^2 \times 0.00007854}{A}$$

Donde:

$AB_{m^2/0.1ha}$: Área basal de cada especie

DAP_i : Diámetro a la altura del pecho del individuo i de la especie de análisis

CCE : Cuadrante con especie

D : Distancia al punto central del área de medición de los individuos de la especie de análisis

A : Área de la parcela

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que efectúen aprovechamiento forestal o puedan tener incidencia o afectación en las áreas de bosque.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación, medición y georreferenciación.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Mediciones y levantamientos en campo.

70. Densidad absoluta (DA)

Objetivo: Establece el número de individuos en relación con un área de análisis determinada. Su cálculo depende del método de parcelación (INVEMAR - ANH, 2013).

Definición: Con el método PCQM:

$$D_{(ind/ha)} = \frac{1}{dm^2} \times 1000$$

Con el método PPC:

$$D_{(ind/ha)} = \frac{NI_i}{A}$$

Donde:

$D_{(ind/ha)}$: Densidad de individuos por hectárea

dm : Distancia promedio de todos los individuos correspondiente a la suma de distancias de los árboles más cercanos a los puntos centrales entre el número total de cuadrantes.

NI_i : Número de individuos de la especie i

A : Área de la parcela

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que efectúen aprovechamiento forestal o puedan tener incidencia o afectación en las áreas de bosque.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación, medición y georreferenciación.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Mediciones en campo.

71. Densidad relativa (DR)

Objetivo: Este indicador evalúa la proporción de una especie en un ensamble de bosque (incluido el mangle) con respecto a las demás especies (INVEMAR - ANH, 2013).

Definición:

Con el método PCQM:

$$D_r = \left(\frac{CE_i}{NTC} \right) \times 100$$

Con el método PPC:

$$D_r = \left(\frac{NE_i}{TIA} \right) \times 100$$

Donde:

D_r : Densidad relativa
 CE : Cuadrantes con la especie i
 NTC : Número total de cuadrantes
 NE_i : Número de individuos de la especie i
 TIA : Total de individuos por área

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que efectúen aprovechamiento forestal o puedan tener incidencia o afectación en las áreas de bosque.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación, medición y georreferenciación.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Mediciones en campo.

72. Abundancia relativa (AR)

Objetivo: Porcentaje de presencia de una especie en un área determinada en relación con la presencia de las demás especies en el área (INVEMAR - ANH, 2013).

Definición:

$$AR_{\%} = \left(\frac{NI_i}{TI} \right) \times 100$$

Donde:

$AR_{\%}$: Abundancia relativa
 NI_i : Número de individuos de la especie tipo i
 TI : Total de individuos

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que efectúen aprovechamiento forestal o puedan tener incidencia o afectación en las áreas de bosque.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación, medición y georreferenciación.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Mediciones en campo.

73. Diámetro promedio cuadrático (DQ)

Objetivo: Este indicador permite establecer el diámetro equivalente del árbol de área basal promedio (INVEMAR - ANH, 2013).

Definición:

Con el método PCQM:

$$D_{q(cm)} = \sqrt{\frac{AB \times 12732.39}{D_{(0.1ha)}}}$$

Con el método PPC:

$$D_{q(cm)} = \sqrt{\frac{40000 \times AB}{\pi \times AA}}$$

Donde:

$D_{q(cm)}$: Diámetro promedio cuadrático

AB : Área basal

$D_{(0.1ha)}$: Densidad absoluta

AA : Número de árboles en el área

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que efectúen aprovechamiento forestal o puedan tener incidencia o afectación en las áreas de bosque.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación, medición y georreferenciación.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Mediciones en campo.

74. Frecuencia Absoluta (FA)

Objetivo: Refiere al número de unidades de muestreo en las que aparece un individuo de determinada especie (INVMAR - ANH, 2013).

Definición:

Con el método PCQM:

$$F_{A(\%)} = \frac{PME_i}{TPM} \times 100$$

Con el método PPC:

$$F_{A(\%)} = \frac{PE_i}{TP} \times 100$$

Donde:

$F_{A(\%)}$: Frecuencia absoluta

PME_i : Puntos de muestreo con especie i

TPM: Total de puntos de muestreo

PE_i: Parcelas con la especie i

TP: Parcelas totales

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que efectúen aprovechamiento forestal o puedan tener incidencia o afectación en las áreas de bosque.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación, medición y georreferenciación.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Mediciones en campo.

75. Frecuencia relativa (FR)

Objetivo: Determina la relación entre la frecuencia absoluta de una especie en relación con la frecuencia absoluta del resto de especies encontradas en los muestreos (INVEMAR - ANH, 2013).

Definición: La aplicación es independiente del método

$$F_{R(\%)} = \frac{FA_i}{FA_{Total}} \times 100$$

Donde:

F_{R(%)}: Frecuencia relativa

FA_i: Frecuencia absoluta de la especie i

FA_{Total}: Frecuencia de las demás especies

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que efectúen aprovechamiento forestal o puedan tener incidencia o afectación en las áreas de bosque.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación, medición y georreferenciación.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Mediciones en campo

76. Índice de Valor de Importancia (IVI)

Objetivo: Evalúa la significancia ecológica de cada especie (INVEMAR - ANH, 2013).

Definición:

$$IVI = AR_{\%} + FR_{\%} + DR_{\%}$$

Donde:

$AR_{\%}$: Abundancia relativa

$F_{R(\%)}$: Frecuencia relativa

$D_{R(\%)}$: Densidad relativa

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que efectúen aprovechamiento forestal o puedan tener incidencia o afectación en las áreas de bosque.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación, medición y georreferenciación.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Mediciones en campo

77. Índice de Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta (AHPPN)

Objetivo: Debido al cambio de los usos del suelo se originan procesos de remoción de las coberturas naturales que inciden en la dinámica de producción fotosintética, denominada producción primaria neta (PPN), afectando sistémicamente a los ecosistemas al modificar las condiciones básicas de las redes tróficas. La PPN es, además, indispensable en el sostenimiento de sistemas socio-ecológicos al ser la fuente de biomasa para la sociedad (alimentos, fibras, energía) y, asimismo, permite el mantenimiento de la biodiversidad y ciclos biogeoquímicos (lo que incluye el ciclo del carbono, y por lo tanto la absorción del CO_2 atmosférico) (Daza-Cruz, 2020; Erb et al., 2009; Haberl et al., 2006).

El índice de Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta (AHPPN) permite evidenciar los niveles de PPN que podrían fluir en ausencia de la introducción de alguna actividad humana y se expresa como la diferencia de una PPN potencial y una PPN relictual. Este mide dos procesos: cambios en la productividad de los ecosistemas que resultan de actividades socioeconómicas (como es el paso de ecosistemas naturales a agroecosistemas o áreas construidas) y la cosecha socioeconómica de la biomasa (Haberl, 1997; Haberl, Erb y Krausmann, 2007; Haberl et al., 2001).

Definición:

$$\begin{aligned}AHPPN &= PPN_0 - PPN_t \\AHPPN &= \Delta PPN_{us} + PPN_h \\ \Delta PPN_{us} &= PPN_0 - PPN_{act} \\ PPN_{act} &= PPN_t + PPN_h\end{aligned}$$

Donde:

PPN_0 : Productividad primaria neta potencial de la vegetación que debería existir en ausencia de las actividades humanas.

PPN_t : Productividad primaria neta de la vegetación actual (bosques, herbazales, cercas vivas y demás ecosistemas naturales aún remanentes).

PPN_h : Productividad primaria neta de la vegetación actual que corresponde a la biomasa recolectada o eliminada por el pastoreo, los cultivos y/o los procesos forestales.

ΔPPN_{us} : Cambios en el potencial de productividad primaria neta por efecto de las actividades humanas (usos del suelo). Se mide como la diferencia entre la PPN_0 y la PPN actual (PPN_{act}).

Responsabilidad: Las actividades que requieran modificar o eliminar las coberturas vegetales para dar paso a otros usos del suelo y la construcción de infraestructuras.

Recursos: Equipos de identificación botánica para la aplicación de ecuaciones alométricas para la estimación de la PPN, información remota, información meteorológica de temperatura, humedad y precipitación, u otras informaciones para la estimación, estadísticas agropecuarias, cartografías participativas para la identificación de usos y coberturas, entre otros. El método elegido dependerá de la escala de análisis.

Periodicidad: La medición debe partir de una evaluación de referencia, en el escenario sin el proyecto, para determinar las condiciones iniciales de apropiación. A partir de esta revisión, se hace una revisión anual que permita reconocer los cambios generados directa e indirectamente por la actividad.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Información remota y/o trabajo en campo en zona de influencia.

78. Índice de fragmentación

Objetivo: Los procesos de fragmentación de hábitats naturales y la progresiva separación espacial de los ecosistemas pueden generar la disminución de la abundancia, distribución y variabilidad de poblaciones en un territorio, generando desequilibrios internos, así como amenazas en la conservación de especies y beneficios de las funciones ecosistémicas. En general, el resultado espacial de la fragmentación es la reducción del tamaño de los sectores cubiertos por vegetación natural, el aislamiento de la fauna, con consecuencias en la conectividad de las especies (lo que depende también de sus características, la disposición de los fragmentos en el paisaje, las características de los espacios entre fragmentos, entre otros) y amenazas a la calidad de las condiciones de sus hábitats (Gurrutxaga, 2003).

El índice de fragmentación es una medida espacial que evidencia el grado de agregación o desagregación de los parches de ecosistemas en un paisaje determinado (Alarcón, 2017; Gurrutxaga, 2003).

Definición:

$$F_i = \frac{AE_i}{AT}$$

Donde:

- F : Índice de fragmentación
- AE_i : Superficie del ecosistema tipo i.
- AT : Superficie total del área de estudio.

Para la interpretación de los niveles de fragmentación de un ecosistema tipo i, se realiza de acuerdo con la Tabla 62.

Tabla 62. Interpretación de rangos y niveles de fragmentación

Rangos de fragmentación (F_i)	Niveles de fragmentación
$F = 1$	Sin fragmentación
$0.7 \leq F < 1$	Fragmentación moderada

Rangos de fragmentación (F _i)	Niveles de fragmentación
$0.5 \leq F = 0.7$	Altamente fragmentado
$F < 0.5$	Insularizado

Fuente: Alarcón (2017)

Responsabilidad: Actividades que puedan generar procesos de fragmentación de hábitats ya sea de manera indirecta, como en la apertura de caminos u otras infraestructura para facilitar la logística asociada, o directa cuando la ejecución de la actividad requiere de la fragmentación.

Recursos: Sistemas de información geográfica.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Imágenes remotas (satelitales, fotografías aéreas, ortofotomosaicos).

79. Índice de contexto paisajístico (fragmentación)

Objetivo: El índice mide la conectividad entre núcleos y o fragmentos naturales y seminaturales en una unidad espacial de referencia, como una medida de la densidad de coberturas en el paisaje del área de influencia de la actividad (Minambiente, 2018).

Definición:

$$CP = \frac{AN}{AT}$$

Donde:

CP: Contexto paisajístico

AN: Área de coberturas naturales o seminaturales dentro del área de estudio

AT: Área total de estudio

Responsabilidad: Actividades que puedan influenciar la modificación de las coberturas del paisaje de su área de influencia, enriqueciendo o propiciando la disminución de las áreas naturales o seminaturales.

Recursos: Información cartográfica remota (imágenes satelitales, fotografías aéreas, imágenes capturadas por drones) y SIG. Equipos para trabajo de campo en el proceso de confirmación de los análisis espaciales.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Información espacial remota y verificación en campo

80. Índice de dimensión fractal

Objetivo: El índice de dimensión fractal describe la forma de los parches relacionando los perímetros y sus superficies para indicar si las formas son sencillas o complejas (Mas & Correa Sandoval, 2000). Las variaciones de las formas dependen en buena medida de la intervención de las actividades humanas. Así grandes parches

menos intervenidos tienden a tener formas más complejas que suelen estar definidas por condiciones naturales como la topografía, en contraste con parches intervenidos o sobre los que se generan presiones que tienen a homogeneizar sus fronteras (Turner et al., 2001).

Definición:

$$DF_p = \frac{\sum_{i=1}^n 2 \frac{\ln(p_i)}{\ln(S_i)}}{NP}$$

Donde:

DF_p : Dimensión fractal promedio
 p_i : Perímetro de cada uno de los parches i
 S_i : Superficie de cada uno de los parches i
 NP : Número de parches en el área de influencia

La dimensión fractal toma valores entre 1 y 2, y si estos son cercanos a uno indica que la forma de los parches es sencilla y valores cercanos a 2 formas más complejas.

Responsabilidad: Actividades que generen procesos de deforestación, aprovechamiento forestal, remoción de la cobertura vegetal y el suelo o que puedan influenciar la forma de los parches dentro del área de influencia.

Recursos: Información cartográfica remota (imágenes satelitales, fotografías aéreas, imágenes capturadas por drones) y SIG.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Información espacial remota

81. Índice de forma (fragmentación)

Objetivo: Evaluar el proceso de cambio del paisaje, en áreas intervenidas con proyectos, obras o actividades; considerando el paisaje como un mosaico de elementos o parches, caracterizados por su tamaño, forma y aislamiento, cuya función principal es ser hábitat de diversas especies (Mas & Correa Sandoval, 2000).

Definición:

$$IF = \frac{p}{2\sqrt{\pi} \cdot S}$$

Donde:

IF: Índice de forma
 p : Perímetro
 S : Superficie

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que tengan el potencial de afectar el paisaje de hábitats forestales.

Recursos: Fotografías aéreas, software fragstats o similar, profesionales capacitados en la interpretación de mapas topográficos y en el uso de software y programas de ayuda para el cálculo de índices.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base del hábitat forestal a evaluar, y luego debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades con potencial de afectar al paisaje.

Nivel de referencia: Puntual en el lugar donde se desarrollen los proyectos, obras o actividades con potencial de afectación al paisaje.

Puntos de lectura: Parches de hábitats forestales seleccionados.

82. Índice de vegetación natural remanente (IVR)

Objetivo: Es el porcentaje del área de un ecosistema que aún conserva vegetación natural y se expresa como un porcentaje respecto al área total del ecosistema. Este índice no solo expresa el estado de los ecosistemas con respecto a sus condiciones naturales, sino que además es un indicativo de la capacidad del mismo para garantizar beneficios ecosistémicos como la regulación climática e hídrica, el mantenimiento de la biodiversidad, la mitigación de riesgos, entre otros. La vegetación natural remanente refiere principalmente a vegetación primaria (Aristizabal et al., 2014).

Definición:

$$IVR = \frac{AVR}{A_t} \times 100$$

Donde:

IVR: Índice de vegetación natural remanente

AVR: Área de vegetación remanente en los biomas, ecosistemas o elementos de la Estructura Ecológica de Soporte (EES).

A_t: Área total en los biomas, ecosistemas o elementos de la Estructura Ecológica de Soporte (EES) a analizar.

La interpretación del índice se realiza de acuerdo con la Tabla 63.

Tabla 63. Interpretación del índice de vegetación natural remanente

Rango del índice IVR	Descripción	Categoría
>= 70%	Sostenibilidad elevada.	Poco o no transformado
70% - 30%	Sostenibilidad aceptable, con posibilidad de mejorarse	Parcialmente transformado
< 30%	Sostenibilidad precaria con altas condiciones de riesgo	Muy transformado

Fuente: Aristizabal et al., (2014).

Responsabilidad: POA que puedan incidir en la modificación de las áreas cubiertas por ecosistemas naturales y las autoridades ambientales y regionales, quienes establecen metas de conservación y restauración para mejorar los niveles de sostenibilidad de los ecosistemas (Aristizabal et al., 2014).

Recursos: Imágenes de sensores remotos, mapas de ecosistemas e inventarios en campo.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base del área de los ecosistemas naturales y debe monitorearse de acuerdo con los planes de restauración y/o conservación por parte de las autoridades ambientales y regionales. En cuanto a las actividades que interfieren en el mantenimiento de ecosistemas naturales, estas deben informar sobre sus compromisos de procesos de restauración asociados a la recuperación de fragmentos de vegetación secundaria baja o alta, y espacios deteriorados.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Información remota y levantamientos en campo.

Componente ecosistemas acuáticos

83. Índice de Calidad Ecológica (ICE)

Objetivo: De acuerdo con la *Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial*, este índice se fundamenta en los métodos descritos por Haase & Nolte (2008), Chalar et al. (2011) y Forero (2012). Siendo el monitoreo biológico la herramienta básica para su aplicación, por lo que está centrado en el uso de los atributos estructurales y/o funcionales de las poblaciones, las comunidades y los ecosistemas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

La aplicación del índice se realiza en varias etapas, que se describen de manera sucinta a continuación:

- I. Análisis de correlaciones entre los parámetros físicos, químicos, y la abundancia de los organismos.
- II. Estimación del gradiente ambiental¹⁴ en el cuerpo de agua, a través de análisis multivariados donde la variable respuesta es la comunidad biótica y las variables explicativas son los parámetros físico químicos.
- III. Identificación de los rangos de tolerancia y valores óptimos para cada taxón, en función del gradiente ambiental del cuerpo de agua estudiado, empleando un modelo de promedio ponderado, como resultado de este análisis se establecen los organismos indicadores.
- IV. Descripción de la ecología de las especies indicadoras. Este paso se elabora con la información secundaria existente.
- V. Cálculo del índice de calidad ecológica, más adelante se incluye la ecuación empleada.
- VI. Análisis de correlación entre los valores del índice y los parámetros físico químicos incluidos en el modelo.
- VII. Análisis de agrupamiento (clúster) del índice por estación. Se sugieren generar tres conglomerados para generar tres categorías.
- VIII. Categorización y visualización espacial de los resultados.

¹⁴ Cambios progresivos en las características del ambiente.

Definición:

$$ICE_i = \frac{\sum_{i=1}^n (Tol_i \times Op_i \times Ab_i)}{\sum_{i=1}^n (Tol_i \times Ab_i)}$$

Donde:

ICE_i : Índice de calidad ecológica

Tol_i : Valor de la tolerancia de cada taxón determinado a partir del promedio ponderado

Op_i : Valor óptimo de cada taxón determinado a partir del promedio ponderado

Ab_i : Promedio de las abundancias de cada taxón por estación transformada a Log10 + 1 (promedio de la abundancia + 1).

Para ampliar la aplicación de este índice se sugiere consultar la Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018).

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en las condiciones de calidad de las fuentes hídricas superficiales.

Recursos: Equipo de profesionales para realizar muestreos de macroinvertebrados, trabajo de campo y análisis de laboratorio

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Aguas abajo de los puntos de captación o descarga de vertimientos o zonas afectadas por represamiento o el cambio en los parámetros físico-químicos de las aguas.

84. Índice Promedio Ponderado Hidrobiológico (IPPH)

Objetivo: De acuerdo con la *Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial*, este índice establece un valor único basado en los resultados del índice de calidad ecológica de cada una de las comunidades evaluadas en la cuenca priorizada. La ponderación de cada índice es requerida para asignar un valor de importancia de acuerdo a las respuestas de las comunidades a los factores bióticos y abióticos, de esta manera, se da más peso a los valores que mejor respuesta presenten a la calidad físico-química. La metodología de cálculo corresponde a una modificación del índice de saprobiedad propuesto por Kolkwitz y Marsson en 1.909 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Definición:

$$IPPH = \frac{\sum IHC \times VP_{IHC}}{\sum VP_{IHC}}$$

Donde:

$IPPH$: Índice promedio ponderado hidrobiológico

IHC : Índice hidrobiológico por comunidad

VP_{IHC} : Valor ponderado

La ponderación de cada índice se asigna de acuerdo con el ajuste en una regresión lineal entre el índice físico-químico (ICA) y cada índice de calidad ecológica, empleando el valor obtenido para el coeficiente de determinación (R^2). Los valores de ponderación se presentan en la Tabla 64.

Tabla 64. Valores de ponderación de acuerdo con el coeficiente de determinación

Coeficiente de determinación R^2	Ponderación
0	0
$> 0 - \leq 0.3$	1
$> 0.3 - \leq 0.6$	2
> 0.6	3

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018)

Los puntajes de calidad ecológica obtenidos del IPPH se interpretan y se representan cartográficamente de acuerdo con la Tabla 65.

Tabla 65. Interpretación de los valores del IPPH

Valor	Interpretación
$> 7.0 - \leq 10.0$	Aguas muy limpias
$> 5.0 - \leq 7.0$	Aguas ligeramente contaminadas
$> 3.0 - \leq 5.0$	Aguas moderadamente contaminadas
$> 1.0 - \leq 3.0$	Aguas muy contaminadas
≤ 1.0	Aguas fuertemente contaminadas

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018)

Para ampliar la aplicación de este índice se sugiere consultar la Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018)

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en las condiciones de calidad de las fuentes hídricas superficiales.

Recursos: Equipo de profesionales para realizar muestreos de macroinvertebrados, trabajo de campo y análisis de laboratorio.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Aguas abajo de los puntos de captación o descarga de vertimientos o zonas afectadas por represamiento o el cambio en los parámetros físico-químicos de las aguas.

85. Índice Biológico BMWP/Col (Biological Monitoring Working Party Score)

Objetivo: Este indicador es tanto una evidencia de la cualidad de los macroinvertebrados, como una referencia de la calidad de los cuerpos de agua. Relaciona la presencia o ausencia de determinadas especies con su

resistencia a las sustancias contaminantes. Es un método simple y rápido donde el análisis surge de la identificación de macroinvertebrados, empleados como bioindicadores (Roldán-Pérez, 2016).

Definición:

$$BMWP/Col = \sum_{f=1}^n P_f$$

Donde:

BMWP/Col: Biological Monitoring Working Party score para Colombia

P_f : Puntuación por familia f

f : Familia

n : Número de familias encontradas

Para el cálculo del índice se parte de una clasificación preliminar de familias de macroinvertebrados en relación con su tolerancia a diferentes grupos de contaminación orgánica. Las familias con menor tolerancia reciben las mayores valoraciones pues su existencia implica que los cuerpos de agua no están sometidos a altas presiones por contaminantes. En este sentido, las familias con mayor tolerancia reciben menor valoración (Roldán-Pérez, 2016). En la Tabla 66 se muestra esta clasificación para especies en Colombia.

Tabla 66. Puntajes de las familias de macroinvertebrados para BMWP/Col

Familia	Puntaje
<i>Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae.</i>	10
<i>Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae.</i>	9
<i>Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelphusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae.</i>	8
<i>Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae.</i>	7
<i>Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.</i>	6
<i>Belostomatidae, Gelastocoridae, Hydropsychidae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae.</i>	5
<i>Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolycopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae.</i>	4
<i>Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae</i>	3
<i>Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae.</i>	2
<i>Tubificidae</i>	1

Fuente: Roldán-Pérez (2016)

Según el resultado del índice, el valor se interpreta de acuerdo con la Tabla 67.

Tabla 67. Interpretación del índice BMWP/Col

Rango del índice	Significado	Categoría de calidad biológica del agua
0 – 0.2	101 -150 o mayor	Aguas muy limpias a limpias
>0.2 – 0.4	61 – 100	Aguas ligeramente contaminadas
>0.4 – 0.6	36 -60	Aguas moderadamente contaminadas
>0.6 – 0.8	16 -35	Aguas muy contaminadas
>0.8 - 1	<15	Aguas fuertemente contaminadas

Fuente: Silva (2008).

Responsabilidad: Esta medición debe ser realizada por las actividades que introduzcan actividades con potencial de generar contaminación orgánica, por las autoridades ambientales en su jurisdicción. Debido a la relativa facilidad de aplicación en ocasiones también puede intervenir la población local.

Recursos: Mediciones puntuales con instrumentos y equipo especializado en identificación de especies de macroinvertebrados.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizado desde una medida de referencia o línea base del sistema hídrico a evaluar, y luego debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades con potencial de disposición y/o vertimiento de sustancias contaminantes orgánicas en el agua, que afecten a los macroinvertebrados.

Nivel de referencia: Puntual en el cuerpo de agua en donde se introduzcan actividades con potencial de afectación de sus condiciones biológicas.

Puntos de lectura: Cuerpos de agua.

86. Índice Biótico Andino (IBA)

Objetivo: El Índice Biótico Andino (IBA) es un indicador de las condiciones del agua evaluado a partir de la presencia de macroinvertebrados propios de los ecosistemas andinos. Los macroinvertebrados acuáticos tienen alta sensibilidad a las condiciones de sus ecosistemas y, por lo tanto, son indicadores de los cambios de la calidad del agua que habitan. Para su evaluación se cuenta con una lista de taxas con distribución por encima de los 2000 m.s.n.m. (Prat et al., 2009; Ríos-Touma et al., 2014).

Definición:

$$IBA = \sum_{i=1}^n PF_i$$

Donde:

IBA: Índice biótico andino

PF_i: Puntuación asociada a las diferentes familias que pueden ser muestreadas en un cuerpo de agua de los Andes en alturas superiores a 2000 m.s.n.m. de acuerdo con su tolerancia a la contaminación (Tabla 68).

Tabla 68. Puntuaciones del índice Biótico Andino (IBA) para las familias de macroinvertebrados de los Andes en alturas desde 2000 m.s.n.m.

Orden	Familia	Puntuación (PF)
Acari	Hidracarina	4
Amphipoda	Hyalellidae	6
Annelida	Annelida Oligocheata	1
Bivalvia	Sphaeriidae	3
Coleoptera	Dryopidae	5
Coleoptera	Dytiscidae	3
Coleoptera	Elmidae	5
Coleoptera	Gyrinidae	3
Coleoptera	Hydraenidae	5
Coleoptera	Hydrophilidae	3
Coleoptera	Staphylinidae	3
Collembola	Collembola	0
Diptera	Athericidae	10
Diptera	Blepharoceridae	10
Diptera	Ceratopogonidae	4
Diptera	Chironomidae	2
Diptera	Culicidae	2
Diptera	Dixidae	4
Diptera	Dolichopodidae	4
Diptera	Empididae	4
Diptera	Ephydriidae	2
Diptera	Limoniidae	4
Diptera	Muscidae	2
Diptera	Psychodidae	3
Diptera	Simuliidae	5
Diptera	Stratiomyidae	4
Diptera	Syrphidae	1
Diptera	Tabanidae	4
Diptera	Tipulidae	5
Ephemeroptera	Baetidae	4
Ephemeroptera	Leptohyphidae	7
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	10
Ephemeroptera	Oligoneuridae	10
Gasteropoda	Ancylidae	6
Gasteropoda	Hydrobiidae	3
Gasteropoda	Lymnaeidae	3
Gasteropoda	Physidae	3

Orden	Familia	Puntuación (PF)
Gasteropoda	Planorbidae	3
Glossiphoniiformes	Glossiphoniidae	1
Haplotaxida	Haplotaxidae	3
Heteroptera	Belostomatidae	4
Heteroptera	Corixidae	5
Heteroptera	Gerridae	5
Heteroptera	Naucoridae	5
Heteroptera	Notonectidae	5
Heteroptera	Veliidae	5
Hidrudinea	Sp.	5
Hydracarina	Sp.	4
Hydroida	Hydridae	10
Lepidoptera	Lampyridae	5
Lepidoptera	Psephenidae	5
Lepidoptera	Ptilodactylidae	5
Lepidoptera	Pyrilidae	4
Lepidoptera	Scirtidae (Helodidae)	5
Megaloptera	Corydalidae	6
Odonata	Aeshnidae	6
Odonata	Calopterygidae	8
Odonata	Coenagrionidae	6
Odonata	Gomphidae	8
Odonata	Libellulidae	6
Odonata	Polythoridae	10
Oligochaeta	Sp.	1
Ostracoda	Sp.	3
Plecoptera	Gripopterygidae	10
Plecoptera	Perlidae	10
Trichoptera	Anomalopsychidae	10
Trichoptera	Calamoceratidae	10
Trichoptera	Glossosomatidae	7
Trichoptera	Helicopsychidae	10
Trichoptera	Hydrobiosidae	8
Trichoptera	Hydropsychidae	5
Trichoptera	Hydroptilidae	6
Trichoptera	Leptoceridae	8
Trichoptera	Limnephilidae	7
Trichoptera	Odontoceridae	10
Trichoptera	Philopotamidae	8

Orden	Familia	Puntuación (PF)
Trichoptera	Polycentropodidae	8
Trichoptera	Xiphocentronidae	8
Tricladia/Seriata	Planariidae	5
Turbellaria	Sp.	5
Veneroida	Sphaeriidae	3

Fuente: Prat et al. (2009)

Para interpretar el resultado del índice puede seguirse la guía de la Tabla 69.

Tabla 69. Interpretación del índice IBA

Rango de ABI	Condiciones del cuerpo hídrico
>95	Muy bueno
59 - 95	Bueno
35 - 58	Moderado
14 - 35	Malo
<14	Pésimo

Fuente: Ríos-Touma et al. (2014)

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en las condiciones de calidad de las fuentes hídricas, ubicadas en la cordillera de los Andes sobre los 2000 m.s.n.m.

Recursos: Equipo de profesionales para realizar muestreos de macroinvertebrados y análisis de laboratorios.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Trabajo de campo y análisis de laboratorio

87. Índice de tolerancia mínima de macroinvertebrados Sabana de Bogotá

Objetivo: Este indicador es un sistema de indicación biológica que permite medir de contaminación de aguas corrientes en la Sabana de Bogotá a partir de la asignación de valores de resistencia a la contaminación a 57 familias de macroinvertebrados, relacionado su distribución con los procesos de contaminación orgánica (Riss et al., 2002). De acuerdo con la Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018) la metodología para el cálculo del indicador se puede aplicar a otras regiones en Colombia, aunque su planteamiento se realizó originalmente para esta región del país.

Definición:

$$ITMSB = \sum_{i=1}^n Tm_i$$

Donde:

ITMSB: Índice de tolerancia mínima de macroinvertebrados Sabana de Bogotá

Tm_i : Tolerancia mínima por familia de invertebrados *i* (Tabla 70)

Tabla 70. Valores de tolerancia mínima de macroinvertebrados en la Sabana de Bogotá

Índice	Familia	Tm
10	Calamoceratidae	9.5
	Hydrochidae	9.5
	Psephenidae	9.5
9	Anomalopsychidae	8.6
	Curculionidae	8.6
	Ptilodactylidae	8.6
	Aeshnidae	8.6
	Delphacidae	8.6
	Hydropsychidae	8.6
	Perlidae	8.6
	Polycentropodidae	8.6
8	Xiphocentronidae	7.7
	Leptohyphidae	7.7
	Blephariceridae	7.6
	Cladocera	7.6
	Muscidae	7.6
	Glossosomatidae	7.6
	Leptophlebiidae	7.6
7	Leptoceridae	7
	Helicopsychidae	6.9
	Cantharidae	6.7
	Collembola	6.7
	Ancylidae	6.5
	Baetidae	6.5
	Ceratopogonidae	6.5
	Mermethidae	6.5
	Tabanidae	6.5
	Simuliidae	6.4
	Hydroptilidae	6.1
6	Hydrobiosidae	5.6
	Scirtidae	5.2
5	Elmidae	5
	Hydrophilidae	4.7
	Acari	4.5
	Amphipoda	4.5
	Coenagrionidae	4.5
	Dixidae	4.5

Índice	Familia	Tm
	Empididae	4.5
	Gerridae	4.5
	Gyrinidae	4.5
	Notonectidae	4.5
	Saldidae	4.5
	Staphilinidae	4.5
	Tetanoresidae	4.5
4	No aplica	No aplica
3	Tipulidae	3
	Bivalvia	2.9
	Hirudinea	2.4
	Planorbid	2.1
2	Pyrilidae	1.9
	Culicidae	1.8
	Dytiscidae	1.8
	Chironomidae	1.5
	Haplotaxida	1.5
	Physidae	1.5
	Planariidae	1.5
	Psychodidae	1.5
	Syrphidae	1.5

Fuente: Riss et al. (2002)

La interpretación del índice se realiza de acuerdo con la Tabla 71 (que a su vez es utilizada para interpretar el *BMWP*).

Tabla 71. Interpretación del Índice de tolerancia mínima de macroinvertebrados Sabana de Bogotá

Rango del índice	Categoría de calidad biológica del agua
101 -150 o mayor	Aguas muy limpias a limpias
61 – 100	Aguas ligeramente contaminadas
36 -60	Aguas moderadamente contaminadas
16 -35	Aguas muy contaminadas
<15	Aguas fuertemente contaminadas

Fuente: Silva (2008)

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en las condiciones de calidad de las fuentes hídricas en las inmediaciones de la Sabana de Bogotá.

Recursos: Equipo de profesionales para realizar muestreos de macroinvertebrados y análisis de laboratorios.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

88. Índice de Calidad Ecológica con Base en Macroinvertebrados Acuáticos para la Cuenca del Río Negro (ICE_{RN-MAE})

Objetivo: Este índice propone un sistema de bioindicación de la calidad de las aguas a partir de la generación de valores de referencia asociados a variables biofísicas para diferentes especies de macroinvertebrados, establecidos mediante un gradiente ambiental en un análisis de correspondencia; la identificación de cada tazón y sus rangos de tolerancia en función del gradiente; y ponderaciones de calidad (Forero et al., 2014). De acuerdo con la Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018) la metodología para el cálculo del indicador se puede aplicar a otras regiones en Colombia, aunque su planteamiento se realizó para esta región del país.

Definición:

$$ICE_{RN-MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n (Op_i \times To_i \times Ab_i)}{\sum_{i=1}^n (Op_i \times Ab_i)}$$

Donde:

ICE_{RN-MAE}: Índice de calidad ecológica con base en macroinvertebrados acuáticos

Op_i: Valor óptimo para cada tipo de macroinvertebrado bentónico tipo i (Tabla 72)

To_i: Tolerancia para cada tipo de macroinvertebrado bentónico tipo i (Tabla 72)

Ab_i: Abundancia obtenida en los muestreos para cada tipo de macroinvertebrado bentónico tipo i (Tabla 72)

Tabla 72. Macroinvertebrados bénticos encontrados en la cuenca del río Negro con los correspondientes registros óptimos (*Op_i*) y de tolerancia (*To_i*)

Orden	Familia	Género	Op _i	To _i
Basommatophora	Ancylidae	sp.	8.6	2.1
Basommatophora	Lymnaeidae	<i>Lymnaea</i>	9.2	0.5
Basommatophora	Physidae	<i>Physa</i>	9.4	1.5
Basommatophora	Planorbidae	<i>Biomphalaria</i>	9.9	0.4
Coleoptera	Elmidae	<i>Heterelmis</i>	9.6	0.1
Coleoptera	Gyrinidae	<i>Gyrinus</i>	6.4	2.2
Coleoptera	Hydrophilidae	sp.	6.2	3.5
Coleoptera	Ptilodactylidae	<i>Tetraglossa</i>	9.8	0.1
Coleoptera	Staphylinidae	sp.	6.2	2.3
Diptera	Chironomidae	<i>Chironomus</i>	3.7	1.2
Diptera	Chironomidae	<i>Endotribelos</i>	9.4	0.7
Diptera	Chironomidae	<i>Orthocladiinae sp. 1</i>	5.2	2.7
Diptera	Chironomidae	<i>Orthocladiinae sp. 2</i>	9.5	0.9
Diptera	Chironomidae	<i>Parachironomus</i>	7.1	1.6
Diptera	Chironomidae	<i>Paratanytarsus</i>	8.6	1.6
Diptera	Chironomidae	<i>Polypedylum</i>	7.4	2.9
Diptera	Chironomidae	<i>Pseudochironomus</i>	8.4	1.6

Orden	Familia	Género	Op _i	To _i
Diptera	Chironomidae	<i>Tanypodinae sp. 1</i>	8.1	3.8
Diptera	Empididae	<i>Chelifera</i>	9.8	0.1
Diptera	Empididae	<i>Hemerodromia</i>	9.7	0.1
Diptera	Ephydriidae	<i>sp. 1</i>	9.8	1.4
Diptera	Ephydriidae	<i>sp. 2</i>	7.1	1.4
Diptera	Muscidae	<i>Lispe</i>	2.2	1.7
Diptera	Psychodidae	<i>Clognia</i>	6.2	2.2
Diptera	Psychodidae	<i>Psychoda</i>	5.9	1.9
Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	9.6	0.6
Diptera	Syrphidae	<i>Eristalis</i>	8.3	2.2
Diptera	Tipulidae	<i>Limonia</i>	6.9	1.2
Diptera	Tipulidae	<i>Molophilus</i>	6.4	2.1
Diptera	Tipulidae	<i>Tipula</i>	9.6	0.3
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Americabaetis</i>	9.1	0.7
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetodes</i>	9	1.4
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Camelobaetidius</i>	9.8	0.1
Haplontaxida	Indeterminado	<i>sp.</i>	1.7	3.4
Hemiptera	Mesoveliidae	<i>Mesoveloidea</i>	9.7	0.1
Hemiptera	Naucoridae	<i>Limnocoris</i>	9.7	0.1
Hemiptera	Veliidae	<i>Rhagovelia</i>	8.9	0.8
Hydracarina	Indeterminado	<i>sp.</i>	7.8	1.8
Lepidoptera	Crambidae	<i>sp.</i>	8.9	2.6
Megaloptera	Corydalidae	<i>Corydalus</i>	7.4	1.4
Mesogastropoda	Hydrobiidae	<i>sp.</i>	8.5	2.1
Odonata	Aeshnidae	<i>Rhionaeschna</i>	8.3	1
Odonata	Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>	9.6	0.7
Odonata	Coenagrionidae	<i>Argia</i>	8	1.6
Odonata	Gomphidae	<i>Progomphus</i>	9.7	0.4
Odonata	Libellulidae	<i>Brechmorhoga</i>	9	1.2
Odonata	Libellulidae	<i>Erythemis</i>	8.2	1.2
Pharyngobdellida	Erpobdellidae	<i>sp.</i>	7	2.6
Rhynchobdellida	Glossiphoniidae	<i>Hellobdella</i>	5.3	2.3
Trichoptera	Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>	8.9	0.9
Trichoptera	Glossosomatidae	<i>Culoptila</i>	9.7	0.3
Trichoptera	Helichopsychidae	<i>Helichopsyche</i>	9.5	1
Trichoptera	Hydrobiosidae	<i>Atopsyche</i>	9.6	0.6
Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptonema</i>	9.7	0.1
Trichoptera	Hydroptilidae	<i>Metrichia</i>	9.5	0.6
Trichoptera	Hydroptilidae	<i>Oxyethira</i>	8.8	1.4
Trichoptera	Leptoceridae	<i>Nectopsyche</i>	9.6	0.5
Veneroida	Sphaeriidae	<i>sp.</i>	8.9	1.6

Fuente: Forero et al., 2014

La interpretación del índice se realiza de acuerdo con la Tabla 73.

Tabla 73. Interpretación del ICE_{RM-MAE}

ICE_{RM-MAE}	Calidad ecológica
≤ 4.9	Crítica
5 - 6	Regular
> 6.1	Buena

Fuente: Forero et al., 2014

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en las condiciones de calidad de las fuentes hídricas.

Recursos: Equipo de profesionales para realizar muestreos de macroinvertebrados y análisis de laboratorios.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Trabajo de campo y análisis de laboratorio

89. Índice de Estado Limnológico (IEL)

Objetivo: El índice de estado limnológico (IEL) es una medida de la calidad de cuerpos hídricos de ambientes cenagosos, calculado a partir de la evaluación de múltiples atributos físicos, químicos y biológicos (Tabla 74), cuyas condiciones se asocian a las características de ambientes tropicales. Su propósito es predecir efectos posibles a su funcionamiento ecológico por la incidencia de diferentes actividades. Existe una versión IEL completa que analiza 12 parámetros y una versión parcial (IELP) que excluye cuatro de ellos (Pinilla Agudelo, 2016a; Pinilla Agudelo et al., 2010).

Tabla 74. Parámetros hidráulicos y de calidad para el IEL

Parámetro	Unidad de medición	Relación con la ecología de las ciénagas
Relación área/volumen de la ciénaga (A/V)	Adimensional	Colmatación del sistema acuático.
pH	Unidades	El rango normal varía de cinco a nueve, pues los valores extremos limitan el desarrollo de diferentes especies.
Conductividad, salinidad (Cond)	μ Siemens/cm	Representa la riqueza iónica en donde valores superiores a 400 μ Siemens/cm podrían ser indicadores de contaminación y estrés para los organismos de agua dulce.
Nitratos (NO_3)	mg/L	Nitrificación, desnitrificación, crecimiento de fitoplancton; por encima de 5 mg/L indica eutrofia.
Fósforo total (PT)	mg/L	Incluye las diferentes formas químicas del fósforo, donde los fosfatos favorecen el crecimiento de fitoplancton. Por encima de 0.1 mg/L indica eutrofia.
Relación N/P (N/P)	Adimensional	Relación entre 10 y 16 no representa limitación para los organismos; si es menor a 10, el nitrógeno es limitante; si es mayor a 16, el fósforo es limitante.

Parámetro	Unidad de medición	Relación con la ecología de las ciénagas
Oxígeno disuelto (% de saturación) – SatOx	%	Reaireación, oxidación de materia orgánica, nitrificación, demanda bentónica, fotosíntesis y respiración en ciénagas
Clorofila-a (Clorof)	mg/m ³	Medida indirecta de la biomasa de algas y su producción primaria. Concentraciones mayores a 10 mg/m ³ indican ambientes muy productivos y valores inferiores a 5 mg/m ³ aguas poco productivas.
Producción pesquera (medida de captura por unidad de esfuerzo) (CPUE)	Kg canoa /día	Indicador de la producción pesquera del ecosistema.
Índice de Nygaard (Nygaard)	Adimensional	Relaciones del número de taxones de algas de ambientes eutróficos con los de sistemas oligotróficos. Valores inferiores a uno indican agua con baja concentración de nutrientes y lo contrario denota eutrofia.
Índice BMWP (BMWP)	Adimensional	El Biological Monitoring Working Party (BMWP) representa la calidad de los cuerpos de agua en términos de la presencia de ciertas familias de invertebrados bentónicos asociados a macrófitas. Valores superiores a 120 indican muy buena calidad e inferiores a 60 representan problemas de contaminación.
Índice ASPT (ASPT)	Adimensional	El Average Score Per Tasa (ASPT) es el BMWP dividido entre el número de familias presentes, donde valores cercanos a 10 representan aguas limpias y los cercanos a uno representan sistemas contaminados.

Fuente: Pinilla A et al. (2010)

Definición:

$$IEL = \sum_{i=1}^n V_i \times C_i$$

Donde:

IEL: Índice de estado limnológico

V_i: Factores de ponderación por parámetro evaluado (Tabla 75)

C_i: Valores de calidad por parámetro donde el menor valor es 0 (baja calidad) y el mayor es 1 (alta calidad) obtenidos a partir de curvas de calidad (Figura 9 a Figura 20)

Tabla 75. Factores de ponderación (*V_i*) para las variables del IEL y el IELP

Parámetro	Valor <i>V_i</i> para IEL	Valor <i>V_i</i> para IELp
Relación área/volumen de la ciénaga (A/V)	0.15	0.15
pH	0.05	0.1
Conductividad, salinidad (Cond)	0.1	0.15
Nitratos (NO ₃)	0.1	0.15
Fósforo total (PT)	0.1	0.15
Relación N:P (N/P)	0.05	0.075
Oxígeno disuelto (%de saturación) – SatOx	0.05	0.075
Clorofila-a (Clorof)	0.1	0.15

Parámetro	Valor Vi para IEL	Valor Vi para IELp
Producción pesquera (CPUE)	0.15	-
Índice de Nygaard (Nygaard)	0.07	-
Índice BMWP (BMWP)	0.04	-
Índice ASPT (ASPT)	0.04	-
Sumatoria	1	1

Tomado de: Pinilla A et al. (2010)

Figura 9. Curva de calidad de saturación de oxígeno

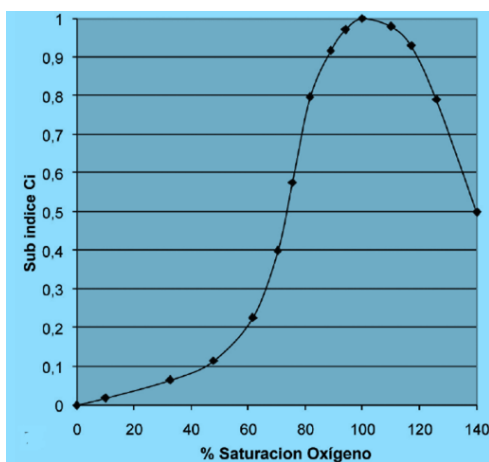


Figura 10. Curva de calidad de pH

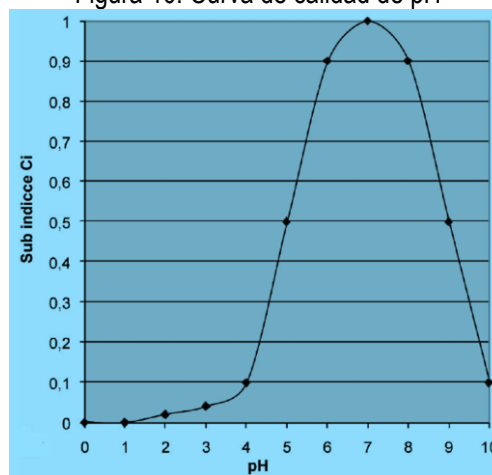


Figura 11. Curva de calidad de Nitrato

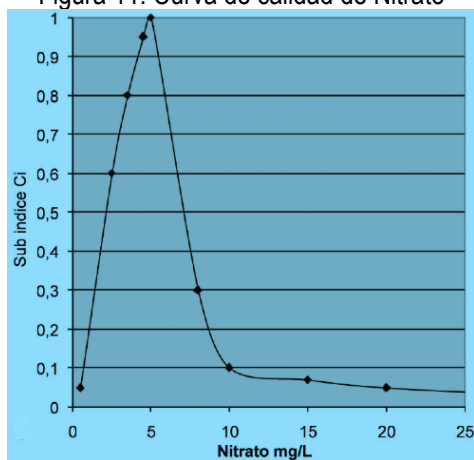


Figura 12. Curva de calidad de Fósforo Total

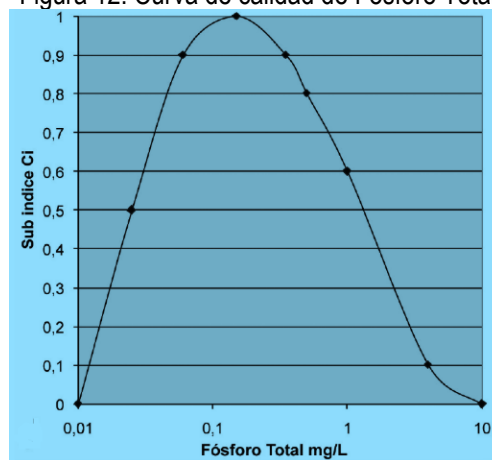


Figura 13. Curva de calidad de la relación N/P

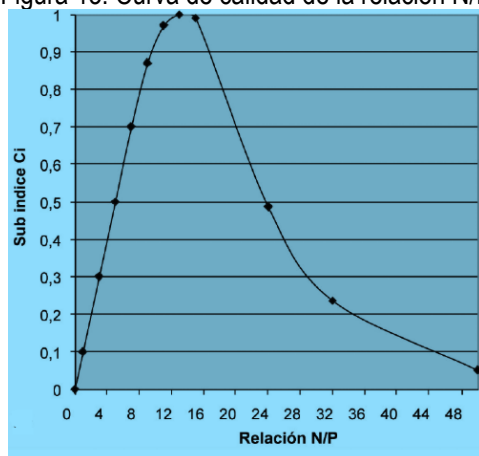


Figura 14. Curva de calidad de conductividad

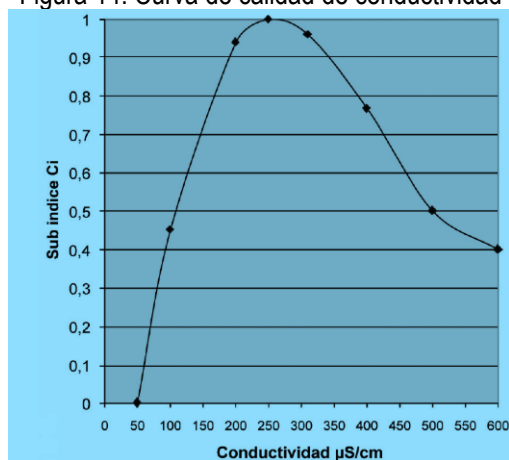


Figura 15. Curva de calidad de la relación A/V

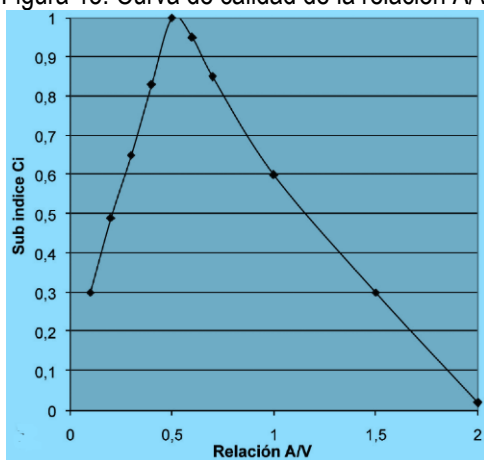


Figura 16. Curva de calidad de Clorofila

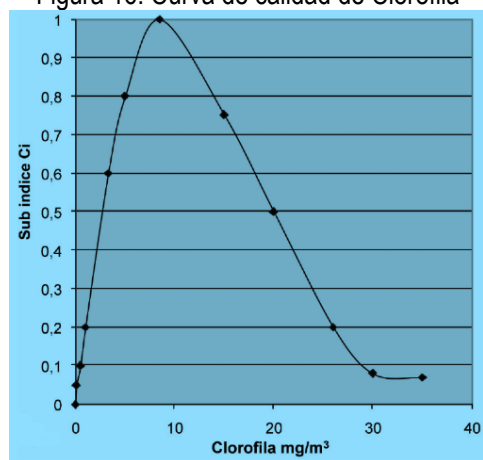


Figura 17. Curva de calidad de CPUE

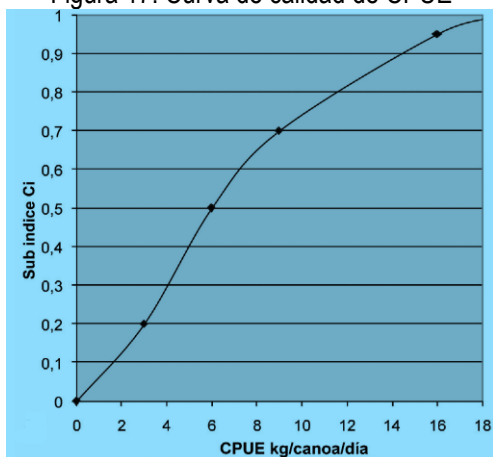
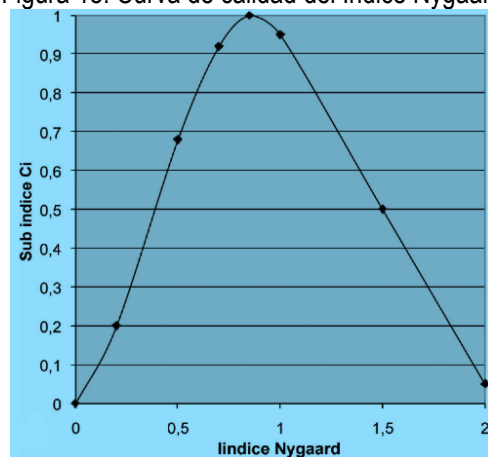
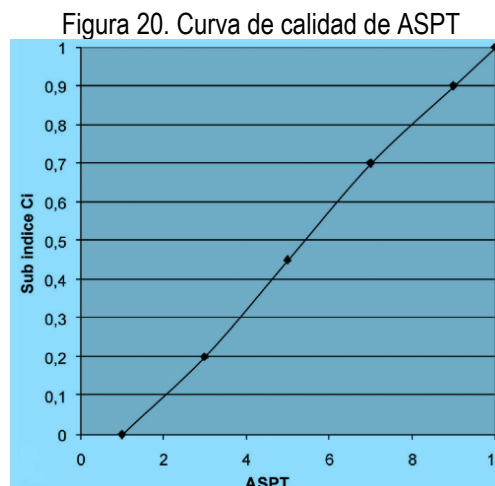
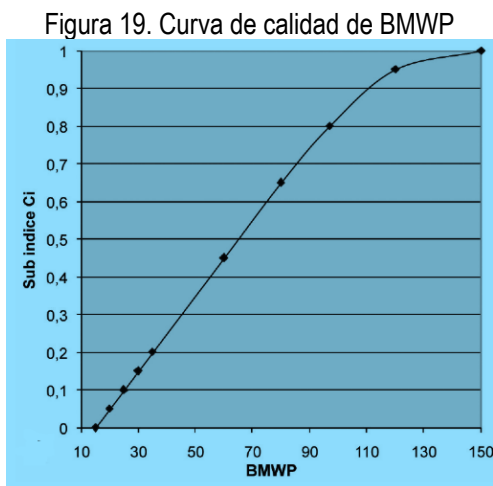


Figura 18. Curva de calidad del Índice Nygaard





Fuente: Pinilla A et al. (2010)

La interpretación del resultado de la aplicación del índice se muestra en la Tabla 76.

Tabla 76. Clasificación limnológica de acuerdo con el IEL

Valor del IEL	Descripción
0 - 40	Estado limnológico crítico. La ciénaga está sometida a fuerte estrés que le impide el cumplimiento de la mayoría de sus funciones ecológicas.
41 - 60	Estado limnológico aceptable. La ciénaga se encuentra dentro de límites aceptables de funcionamiento, pero se presentan disturbios que disminuyen su capacidad de autorregulación.
61 - 80	Estado limnológico adecuado. La ciénaga cumple con la mayoría de sus funciones ecológicas en forma razonable.
81 -100	Estado limnológico óptimo. La ciénaga cumple con todas sus funciones ecológicas adecuadamente.

Tomado de: Pinilla A et al. (2010)

Responsabilidad: Actividades que puedan causar potenciales afectaciones en ciénagas o cuerpos lenticos.

Recursos: Equipos profesionales para la medición fisicoquímica y biológica y los instrumentos necesarios.

Periodicidad: Dos mediciones anuales (en época de lluvias y en época seca), partiendo de mediciones iniciales como referentes de cambio.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Mediciones en campo y análisis de laboratorio

90. Índice de Integridad Biótica de los macroinvertebrados- IIBM (para ecosistemas acuáticos)

Objetivo: Evaluar la calidad del agua en los ecosistemas lénticos como ciénagas, lagos, lagunas, pantanos y humedales, a partir de las variables taxonómicas y funcionales de las comunidades acuáticas. Su resultado indica la condición o estado del cuerpo de agua evaluado, con base en los macroinvertebrados acuáticos. Puede usarse como referencia la propuesta de U.S. EPA (2002).

Tabla 77. Interpretación del resultado del IIBM para ecosistemas acuáticos

Puntaje	Clase	Interpretación	Implicaciones
31 – 40	Buena a excelente	Alta integridad biótica de los macroinvertebrados	Ciénagas con poca intervención humana; contienen todas o casi todas las especies esperadas para la región, incluyendo los taxones más intolerantes, aunque algunos pueden estar ausentes. La comunidad exhibe una estructura trófica equilibrada o ligeramente desbalanceada, pero con éxito reproductivo. Pueden estar presentes algunas especies invasoras o exóticas.
18 – 30	Moderada	Moderada integridad de los macroinvertebrados	Ciénagas con signos de deterioro, los cuales incluyen pérdida de taxones intolerantes, reducción en la riqueza y un desvío fuerte de la estructura trófica (p.e. incremento en la frecuencia de omnívoros o de especies tolerantes); las clases de edad más viejas o los depredadores superiores pueden ser raras.
8 – 17	Pobre a muy pobre	Baja integridad biótica de los macroinvertebrados	Ciénagas dominadas por taxones altamente tolerantes o por especies invasoras; las formas híbridas pueden ser comunes; la presencia de enfermedades, lesiones, parásitos y otras anomalías pueden ser frecuentes. Hay muy baja representación o ausencia total de los taxones menos tolerantes.

Fuente: Martínez-Rodríguez & Pinilla-A. (2015); Pinilla Agudelo (2016b)

Definición:

$$IIBM = TT + TO + PD1 + PD2 + PD3 + PTD + PTF + IDS$$

Donde:

- IIBM: Índice de Integridad Biótica de los macroinvertebrados
- TT: Número total de taxones
- TO: Número de taxones de odonatos
- PD1: Promedio de dominancia 1, taxón más dominante
- PD2: Promedio de la dominancia de los 2 taxones más dominantes
- PD3: Promedio de la dominancia de los 3 taxones más dominantes
- PTD: % de taxones depredadores
- PTF: % de taxones filtradores
- IDS: Índice de diversidad de Shannon

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades que tengan el potencial de afectar la calidad del agua de ecosistemas lénticos.

Recursos: Mediciones puntuales con instrumentos y equipo especializado en identificación de especies de macroinvertebrados.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizado desde una medida de referencia o línea base del sistema hídrico a evaluar, y luego debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades con potencial

de disposición y/o vertimiento de sustancias contaminantes orgánicas en el agua, que afecten a los macroinvertebrados.

Nivel de referencia: Puntual en el cuerpo de agua en donde se introduzcan actividades con potencial de afectación de la calidad del agua.

Puntos de lectura: Cuerpos de agua.

91. Índice de Condiciones Limnológicas (ICOL)

Objetivo: El índice de Condiciones Limnológicas busca evaluar los niveles de calidad de humedales de Bogotá, como ecosistemas importantes con diferentes funciones ecológicas y sociales, pero sometidos a una serie de presiones que han redundado en su deterioro. En este contexto, el índice permite una medición de las condiciones limnológicas de los humedales y determinar su capacidad para cumplir con sus funciones ecológicas (Guillot Monroy & Pinilla Agudelo, 2017).

La estimación de ICOL se basa en el cálculo de índices bióticos de cuatro comunidades (fitoplancton, diatomeas perifíticas, macrófitas y macroinvertebrados) relacionadas con diferentes variables biofísicas (conductividad, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, pH, cloruro, carbonato, dureza, amoníaco, nitritos, nitratos, fosfatos y demanda biológica de oxígeno.). La evaluación parte del cálculo del índice de polución (IP) de cada variable y, a partir de este, los valores de polución por taxones (VPT), clave en la estimación de los índices bióticos (IB) a partir de los que se calcula ICOL (Guillot Monroy & Pinilla Agudelo, 2017; Pinilla Agudelo, 2010, 2016a).

Definición:

$$IP = \sum_{i=1}^n \frac{C}{LC}$$

$$VPT_c = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\ln \frac{10PI}{n} \right)^j}{N}$$

$$IB_c = \frac{\sum_{c=1}^m VPT_c}{M}$$

$$ICOL = \left[(100 - (\%IB_{Fitto} \times 0.3)) + (100 - (\%IB_{Diatom} \times 0.3)) \right. \\ \left. + (100 - (\%IB_{Macroinv} \times 0.1)) + (100 - (\%IB_{Macrofit} \times 0.3)) \right]$$

Donde:

- IP : Índice de polución por cada variable fisicoquímica tipo i
- C : Concentración de la variable fisicoquímica tipo i
- LC : Límites de concentración de cada una de las variables tipo i de acuerdo con el Decreto 1594 de 1984
- i : Variables que dentro de la ley colombiana tienen límites asociados al consumo y que se asocian con los sistemas ecológicos.
- n : Número de variables
- VPT_c : Valor de polución para un taxón específico c
- N : Número de estaciones donde los taxones son colectados

j : Cada una de las estaciones donde los taxones son colectados
 IB_c : Índice biótico para cada una de las comunidades (fitoplancton, diatomeas perifíticas, macrófitas y macroinvertebrados)
 m : Número de comunidades (cuatro en este caso)
 M : Número de especies de una comunidad o taxón
 $ICOL$: Índice de condiciones limnológicas
 $\%IB_{Fitto}$: Índice biótico para el fitoplancton
 $\%IB_{Diatom}$: Índice biótico para las diatomeas perifíticas
 $\%IB_{Macroinv}$: Índice biótico para los macroinvertebrados
 $\%IB_{Macrofit}$: Índice biótico para las macrófitas

Para interpretar los resultados del índice se sigue la guía de la Tabla 78.

Tabla 78. Interpretación del índice ICOL y los Índices Bióticos (IB) de cada comunidad

IB Fitoplancton	IB Diatomeas	IB Macro- invertebrados	IB Macrófitas	ICOL (%)	Interpretación e implicaciones
> 50	> 30	> 15	> 20	> 35	Humedal ligeramente contaminado, con óptimas o buenas condiciones limnológicas con funciones ecológicas que se cumplen satisfactoriamente
30 - 50	15 -30	10 - 15	10 -20	17.5 - 35	Humedal moderadamente contaminado, con aceptables condiciones limnológicas con funciones ecológicas que se cumplen dentro de límites tolerables
5 - 30	5 -15	3 -10	3 -10	4 – 17.5	Humedal muy contaminado, con regulares condiciones limnológicas con funciones ecológicas que se dan de manera anómala o incompleta
< 5	< 5	< 3	< 3	< 4	Humedal severamente contaminado, con malas o deficientes condiciones limnológicas y funciones ecológicas que no se cumplen totalmente o se han perdido

Fuente: Guillot Monroy & Pinilla Agudelo (2017)

Responsabilidad: Actividades con potencial de cambiar las condiciones de calidad de ecosistemas lenticos como humedales urbanos.

Recursos: Equipos profesionales para la medición fisicoquímica y biológica y los instrumentos necesarios

Periodicidad: Dos mediciones anuales (en época de lluvias y en época seca), partiendo de mediciones iniciales como referentes de cambio.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Mediciones en campo y análisis de laboratorio

Componente coberturas de la tierra

92. Cambio en la superficie cubierta por bosque natural (CSBN)

Objetivo: Este indicador evalúa el cambio en las coberturas de bosque natural partir de la comparación de la superficie de bosque mantenido o recuperado y el bosque deforestado entre dos periodos consecutivos. De esta manera, se busca conocer de manera precisa las modificaciones a las coberturas boscosas, para priorizar decisiones de manejo.

Se entiende por bosque natural las áreas ocupadas principalmente por árboles sumados a especies de arbustos, palmas, guaduas, hierbas y lianas, completando diferentes estratos estructurales. Además, el dosel tiene una densidad mínima del 30% con altura y superficie mínima de cinco metros y una hectárea, respectivamente. No entran en esta definición las plantaciones forestales, los cultivos de palma y árboles sembrados para producción agropecuaria (Galindo, G Vergara, L. K. Cabrera, 2019).

Definición:

$$CSBN_{j(t_1-t_2)} = \frac{SR_{j(t_1-t_2)} - SD_{j(t_1-t_2)}}{t_2 - t_1}$$

$$SR_{j(t_1-t_2)} = nR_{j(t_1-t_2)} \times A$$

$$SD_{j(t_1-t_2)} = nD_{j(t_1-t_2)} \times A$$

Donde:

$CSBN_{j(t_1-t_2)}$: Cambio de la superficie de bosque natural en la unidad espacial de referencia j, entre los años t_1 y t_2 , en hectáreas.

$SR_{j(t_1-t_2)}$: Superficie regenerada en la unidad espacial de referencia j en el periodo de análisis, en hectáreas.

$SD_{j(t_1-t_2)}$: Superficie deforestada en la unidad espacial de referencia j en el periodo de análisis, en hectáreas.

$nR_{j(t_1-t_2)}$: Total de pixeles que en el análisis espacial son clasificados como “Regeneración” dentro de la unidad espacial de referencia j, en el tiempo de análisis.

$nD_{j(t_1-t_2)}$: Total de pixeles que en el análisis espacial son clasificados como “Deforestación” dentro de la unidad espacial de referencia j, en el tiempo de análisis.

A : Área de cada pixel en hectáreas

La interpretación del índice se realiza de acuerdo con la (Tabla 79).

Tabla 79. Interpretación del índice de cambio de superficie de bosque natural

Valor del índice CSBN	Descripción
<0	Pérdidas netas de superficie de bosque natural
0	Superficie de bosque natural estable
>0	Ganancias netas de superficie de bosque natural

Fuente: Galindo, G Vergara, L. K. Cabrera (2019)

Responsabilidad: Actividades que puedan disminuir el área de las coberturas boscosas naturales tanto directamente, debido a operaciones propias de la actividad, como indirectamente por influencia en las dinámicas locales que generen recuperación de bosques o su deforestación.

Recursos: Información oficial del sistema de monitoreo de bosques e información cartográfica como imágenes satelitales, fotografías aéreas o imágenes capturadas con drones. La información espacial debe ser analizada a través de SIG.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia del medio biótico.

Puntos de lectura: Información oficial e información cartográfica asociada en SIG

93. Tasa anual de cambio de superficie cubierta por diferentes coberturas (TCDC)

Objetivo: Este indicador permite determinar la dinámica que presentan los cambios que presenta la superficie de la tierra, asociados con la intervención antrópica del territorio, y cuantificar la tasa en la que algunas coberturas ganan y otras pierden superficie. Al realizar un monitoreo a la superficie cubierta por diferentes tipos de cobertura en el tiempo, se convierte en un referente de la toma de decisiones de gestión ambiental en relación con las coberturas de la tierra (Peña & Rodríguez, 2017a).

La clasificación de coberturas se realiza según la metodología *Corine Land Cover* para Colombia, cuyas clasificaciones de primer nivel son territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua (IDEAM, 2010b; Peña & Rodríguez, 2017a). En la Tabla 80 se realiza una breve descripción de cada una de las coberturas de primer nivel.

Tabla 80. Descripción general de las coberturas de primer nivel según la metodología CORINE Land Cover para Colombia

Cobertura de primer nivel	Descripción
Territorios artificializados	Ciudades, centros poblados y zonas periféricas que se suman al área urbana por procesos de artificialización y retiro de coberturas para actividades comerciales, industriales y recreativas.
Territorios agrícolas	Territorios dedicados a la producción de alimentos, fibras u otras materias primas.
Bosques y áreas seminaturales	Coberturas vegetales de tipo boscoso, arbustivo y herbáceo en diferentes sustratos y pisos altitudinales, resultado de diferentes procesos climáticos. En este caso se incluyen coberturas de origen antrópico como plantaciones forestales y vegetación secundaria o en transición.
Áreas húmedas	Terrenos anegadizos que en temporadas pueden ser inundados y estar parcialmente cubiertos por vegetación acuática tanto en bordes marinos como al interior del continente.
Superficies de agua	Cuerpos y cauces de aguas permanentes, intermitentes y estacionales en el continente o adyacentes a la línea de la costa continental, como los mares. Se incluyen fonos asociados a los mares con profundidades de máximo 12 metros.

Fuente: Peña & Rodríguez (2017).

En resumen, el índice presenta el cambio para cada una de las coberturas y su aplicación se realiza en relación con las áreas potencialmente afectadas por una actividad.

Definición:

$$TCDC_{ijt1-2} = \left[\frac{\left(\frac{SCT_{ijt_2} - SCT_{ijt_1}}{SCT_{ijt_1}} \right)}{(t_2 - t_1)} \right] \times 100$$

Donde:

$TCDC_{ijt1-2}$: Promedio anual de variación en la superficie que ocupa la cubierta de la tierra i, en la unidad espacial de referencia j entre dos instantes de tiempo t, 1 y 2.

SCT_{ijt_1} : Superficie de la cobertura de la tierra i, en la unidad espacial de referencia j en el tiempo t_1 (ha).

SCT_{ijt_2} : Superficie de la cobertura de la tierra i, en la unidad espacial de referencia j en el tiempo t_2 (ha).

t_1 : Tiempo inicial del periodo de análisis

t_2 : Tiempo final del periodo de análisis

La interpretación del índice se realiza de acuerdo con la (Tabla 81) para cada una de las coberturas analizadas.

Tabla 81. Interpretación del índice de promedio anual de la variación de la superficie por tipo de cobertura

Valor del índice TCDC	Descripción
<0	Disminución de la superficie de la cobertura i
0	La cobertura i no presentó variación
>0	Aumento de la superficie de la cobertura i

Fuente: Peña & Rodríguez (2017).

Para que los datos de superficie cubierta por diferentes tipos de cobertura obtenidos en los dos instantes de tiempo sean comparables, éstos deben haber sido generados para la misma escala y mediante el mismo protocolo (Peña & Rodríguez, 2017a).

Responsabilidad: Actividades que puedan cambiar las coberturas del territorio.

Recursos: Información oficial de coberturas e información cartográfica como imágenes satelitales, fotografías aéreas o imágenes capturadas con drones. La información espacial debe ser analizada a través de SIG.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia del medio biótico.

Puntos de lectura: Información oficial e información cartográfica asociada en SIG

94. Proporción de la Superficie Cubierta por Bosque Natural (PSNB)

Objetivo: El índice permite conocer el porcentaje de cobertura de bosque natural en un área espacial de referencia en un tiempo de análisis determinado para generar tendencias históricas y orientar acciones de gestión cuando estas evidencian problemas (Galindo et al., 2019).

Definición:

$$PSNB_{jt} = \left(\frac{SCBN_{jt}}{AUER_{jt}} \right) \times 100$$

$$SCBN_{jt} = nBN_{jt} \times A$$

Donde:

$PSNB_{jt}$: Proporción de la superficie de bosque natural o los ecosistemas estratégicos tipo i en una unidad espacial de referencia j, en un tiempo t.

$SCBN_{jt}$: Superficie en hectáreas de bosque natural en la unidad espacial de referencia j, en el tiempo t.

$AUER_{jt}$: Superficie total en hectáreas del área espacial de referencia j, en el tiempo t.

nBN_{jt} : Número de pixeles clasificados como bosque natural en el área espacial de referencia j, en el tiempo t.

A : Área en hectáreas de cada pixel.

Responsabilidad: Actividades con potencial de modificar directa o indirectamente las coberturas de bosques naturales en su área de influencia.

Recursos: Información oficial de coberturas e información cartográfica como imágenes satelitales, fotografías aéreas o imágenes capturadas con drones. La información espacial debe ser analizada a través de SIG.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Información oficial e información cartográfica asociada en SIG

95. Variación de la superficie de los ecosistemas naturales continentales (VSENC)

Objetivo: Este índice representa los niveles de variación de las coberturas de ecosistemas naturales continentales de un periodo con respecto a otro de referencia. Para las mediciones nacionales, la línea base es de los años 2006 – 2009. A partir de esa medición se generan alertas sobre posibles pérdidas o ganancias en la superficie de ecosistemas naturales y aporta información para el monitoreo y seguimiento, así como la priorización de la gestión ambiental (Ramirez et al., 2018). En la Tabla 82 se muestran los diferentes ecosistemas continentales de análisis en el indicador y que se encuentran el Mapa de Ecosistemas Continentales y Marinos -escala 1.100.000- (IDEAM 2005 Citado en Ramirez et al., 2018).

Tabla 82. Ecosistemas continentales naturales

Tipo	Ecosistema de síntesis	Ecosistema general
Acuático	Arbustal	Arbustal inundable andino
		Arbustal inundable basal
		Arbustal inundable subandino
	Bosque	Bosque de galería inundable basal
		Bosque inundable andino
		Bosque inundable basal
		Bosque inundable subandino

Tipo	Ecosistema de síntesis	Ecosistema general
	Herbazal	Bosque ripario inundable subandino
		Herbazal inundable andino
		Herbazal inundable basal
		Herbazal inundable subandino
	Lago	Lago tectónico
	Laguna	Laguna Aluvial
		Laguna Glacial
		Laguna Tectónica
	Río	Río de Aguas Blancas
		Río de Aguas Claras
		Río de Aguas Negras
Terrestre	Arbustal	Arbustal andino húmedo
		Arbustal basal húmedo
		Arbustal subandino húmedo
	Bosque	Bosque andino húmedo
		Bosque andino seco
		Bosque basal húmedo
		Bosque basal seco
		Bosque de galería basal húmedo
		Bosque de galería basal seco
		Bosque subandino húmedo
		Bosque subandino seco
	Complejos rocosos	Complejos rocosos de los andes
		Complejos rocosos de serranía
	Desierto	Desierto
	Glaciares y nivales	Glaciares y nivales
	Herbazal	Herbazal andino húmedo
		Herbazal basal húmedo
		Herbazal subandino húmedo

Fuente: Ramirez et al. (2018).

Definición:

$$VSENC_i = \left[\frac{S_{i(t)} - S_{i(tr)}}{S_{i(tr)}} \right] \times 100$$

Donde:

$VSENC_i$: Variación de la superficie del ecosistema natural tipo i (Tabla 82) con respecto a la línea base.
Esta línea base puede corresponder al Mapa de Ecosistemas Continentales y Marinos escala

1.100.000 si la escala de la actividad puede afectar la escala de referencia oficial. De lo contrario, se debe generar línea base en el área de influencia del proyecto en una escala más detallada.

$S_{i(t)}$: Superficie del ecosistema natural tipo i (Tabla 82) en hectáreas

$S_{i(tr)}$: Superficie del ecosistema natural tipo i (Tabla 82) en hectáreas en el periodo de referencia. Este puede relacionarse con la medición oficial o con una línea base detallada a la escala de la actividad previa a su inicio.

Responsabilidad: Actividades con potencial de modificar directa o indirectamente las coberturas de ecosistemas naturales continentales en su área de influencia.

Recursos: Información oficial de coberturas e información cartográfica como imágenes satelitales, fotografías aéreas o imágenes capturadas con drones. La información espacial debe ser analizada a través de SIG.

Periodicidad: Anual comparada con una línea base que puede ser tanto la oficial o generada a una escala más detallada antes de iniciar la actividad.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Información oficial o información cartográfica levantada a escala de la actividad si lo requiere

96. Proporción de la superficie cubierta por diferentes coberturas

Objetivo: Este indicador permite conocer la proporción de la superficie cubierta por diferentes coberturas, identificadas de acuerdo con la metodología Corine Land Cover, con modificación para Colombia a través de la revisión de sus tendencias históricas para comprender la dinámica de los componentes del paisaje. Esta metodología parte de un primer orden jerárquico que a su vez se subdivide y cuya interpretación depende de la escala del análisis (Peña & Rodríguez, 2017b).

En el primer orden jerárquico se encuentran: (1) territorios artificializados; (2) territorios agrícolas; (3) bosques y áreas seminaturales; (4) áreas húmedas; y (5) superficies de agua (Peña & Rodríguez, 2017b).

Definición:

$$PSCC_{kjt} = \frac{SCT_{kjt}}{A_j} \times 100$$

Donde:

$PSCC_{kjt}$: Proporción de la superficie con el tipo de cobertura k, en una unidad espacial de referencia j, en un momento t en relación con área total a analizar.

SCT_{kjt} : Superficie del tipo de cobertura k, en la unidad espacial de referencia j, en el momento t.

A_j : Área total de la unidad espacial de referencia j.

Los tipos de cobertura k son clasificados de acuerdo con el tercer nivel jerárquico de la metodología Corine Land Cover para Colombia y el procedimiento sigue los pasos presentados en la Figura 21 (IDEAM, 2010b; Peña & Rodríguez, 2017b).

Figura 21. Procedimiento de análisis, interpretación y cálculo de las áreas de cobertura



Fuente: elaboración propia con base en Peña & Rodríguez (2017).

Responsabilidad: POA que puedan modificar las coberturas naturales e introducir cambios en los usos del suelo. Las autoridades ambientales pueden aplicarlo como medida de monitoreo de los procesos de planeación territorial.

Recursos: Imágenes de sensores remotos, mapas de ecosistemas, coberturas y usos del suelo, e inventarios en campo.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe partir de una medida de referencia que corresponda a la escala de interés. En el caso de las autoridades ambientales, el monitoreo debe realizarse anualmente para verificar sus procesos de planeación y establecer medidas. Las actividades que induzcan cambios de cobertura deben hacer monitoreo anual y presentarlo a las autoridades ambientales.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Imágenes de sensores remotos.

Componente flora y fauna

97. Riqueza de especies por subgrupo

Objetivo: La riqueza representa el número de especies en determinado territorio y es importante evaluarla para cada uno de los subgrupos (mamíferos, reptiles, anfibios, peces y aves) como referente de la biodiversidad de una región (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012).

Definición:

$$R_i = \sum_{j=1}^n E_{ij}$$

Donde:

R_i : Riqueza del subgrupo i

E_{ij} : Especies tipo j del subgrupo i

Responsabilidad: Actividades con potencial de afectar la biodiversidad en su área de influencia

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificación en campo

98. Número de especies endémicas

Objetivo: Las especies endémicas son aquellas que se tienen lugar en un área muy restringida de un territorio y que son exclusivas de determinada unidad geográfica (Noguera-Urbano, 2017). Para efectos de conocer el número de especies endémicas de fauna, se tiene en cuenta los subgrupos de mamíferos, reptiles, anfibios, peces y aves.

Definición:

$$EE_i = \sum_{j=1}^n EE_{ij}$$

Donde:

EE_i : Número de especies endémicas del subgrupo i

EE_{ij} : Especie endémica j del subgrupo i

Responsabilidad: Actividades que puedan afectar la biodiversidad en zonas en donde se concentra endemismo.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificación en campo

99. Número de especies migratorias

Objetivo: Los animales en general deben movilizarse para satisfacer sus necesidades, abarcando recorridos de diferente magnitud. Dentro de los procesos que motivan la movilidad están la búsqueda de alimentos, parejas sexuales, refugios temporales o permanentes, o para evitar depredadores, aunque usualmente estos suceden dentro de un mismo hábitat. Sin embargo, existen especies que traspasan las barreras de sus hábitats originales y se mueven y ajustan a espacios y tiempos heterogéneos, sin que esto se asocie a respuestas inmediatas y oportunistas (MADS & WWF-Colombia, 2012).

En general, las migraciones ocurren cuando hay desplazamientos persistentes y directos (sin desplazamientos erráticos) de una población de una misma especie, con duraciones superiores a los rutinarios. Adicionalmente, las especies migratorias suprimen respuestas ante estímulos y comportamientos comunes, generan comportamientos particulares en los momentos de salida y llegada de la travesía, y tienen estrategias para ahorrar energía (MADS & WWF-Colombia, 2012). Los lugares clave de estas especies son los orígenes, destinos y zonas de descanso y/o alimentación comúnmente utilizadas por estas en el tránsito de la migración.

Definición:

$$EM_i = \sum_{j=1}^n EM_{ij}$$

Donde:

EM_i : Número de especies migratorias del subgrupo i

EM_{ij} : Especie migratoria j del subgrupo i

Responsabilidad: Actividades que puedan afectar la biodiversidad en zonas clave dentro de los procesos migratorios de diferentes especies.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificación en campo

100. Número de especies en alguna categoría de amenaza

Este indicador evalúa la existencia de especies en alguna categoría de amenaza de acuerdo con la lista roja (Tabla 83). Esta lista agrupa las especies por grupos taxonómicos (anfibios, aves, invertebrados, mamíferos, peces, plantas y reptiles) y define las siguientes categorías de riesgo: extinto (Ex), extinto en estado silvestre (EW), en peligro crítico (CR), en peligro (EN), vulnerable (VU), casi amenazado (NT), preocupación menor (LC). Además, considera los casos en los que no hay datos insuficientes (DI) para hacer una evaluación completa y los no evaluados (NE), cuando la especie no ha sido asignada a ninguna categoría de riesgo (DANE, 2014; IAvH, 2017; UICN, 2012).

La categorización dentro de los diferentes niveles de amenaza depende de los siguientes criterios: (1) reducción del tamaño de la población; (2) distribución geográfica, como la extensión de la presencia u ocupación; (3) poblaciones pequeñas con tendencias de disminución; (4) población pequeña o restringida; (5) el análisis cuantitativo de la probabilidad de extinción. Cualquiera de estos criterios puede dar lugar a cambios de categoría de amenaza para las especies dependiendo de sus características (UICN, 2012).

Tabla 83. Categorías de amenaza de la lista roja de especies en peligro

Categoría de riesgo	Características
Extinto (Ex)	Cuando no queda ninguna duda de que el último individuo de la especie ha muerto.
Extinto en Estado Silvestre (EW)	Cuando solo sobrevive una población o poblaciones fuera de su distribución original.
En peligro crítico (CR)	Cuando la evidencia indica que se cumplen criterios de reducción del tamaño de la población sospechada entre el 80% y 90%, cuyo hábitat se encuentra severamente reducido o fragmentado.
En peligro (EN)	Cuando la evidencia indica que se cumplen criterios de reducción del tamaño de la población sospechada entre el 50% y el 80% y cuyo hábitat se encuentra muy reducido o fragmentado.

Categoría de riesgo	Características
Vulnerable (VU)	Cuando la especie enfrenta un riesgo de extinción alto en estado de vida silvestre con una reducción de la población sospechada de entre el 30% y el 50%.
Casi amenazado (NT)	Cuando a pesar de no cumplir con los criterios para entrar en una categoría de amenaza, hay evidencias de que pueda ocurrir en el futuro.
Preocupación menor (LC)	Cuando no se cumple con ninguna categoría de amenaza, los taxones son abundantes y hay amplia distribución.
Datos insuficientes (DI)	Cuando no hay información adecuada o suficiente para hacer una evaluación directa o indirecta.
No evaluado (NE)	Cuando no ha sido evaluado y por lo tanto no ha sido clasificado en ninguno de los criterios.

Fuente: elaboración propia a partir de UICN (2012)

Dentro de estas, las categorías asociadas a la amenaza de extinción son “En peligro crítico”, “En peligro” y “Vulnerable” sobre las que se evalúa el índice (DANE, 2014)¹⁵.

Definición:

$$NECA_{jt} = EVU_{jt} + EEN_{jt} + ECR_{jt}$$

Donde:

$NECA_{jt}$: Número de especies en alguna categoría de amenaza en la unidad espacial de referencia j, en el periodo t.

EVU_{jt} : Número de especies que se encuentran en la categoría de amenaza “vulnerable” en la unidad espacial de referencia j, en el periodo t.

EEN_{jt} : Número de especies que se encuentran en la categoría de amenaza “peligro” en la unidad de referencia j, en el periodo temporal t.

ECR_{jt} : Número de especies que se encuentran en la categoría de amenaza “en peligro crítico” en la unidad de espacial de referencia j, en el periodo temporal t.

Responsabilidad: Actividades que puedan ocupar espacios que coincidan con especies en diferentes grados de amenaza o que por su naturaleza pueda incidir en calidad de los hábitats o en la modificación de las condiciones de vulnerabilidad de las especies. En caso de que exista la coincidencia espacial de la actividad con el hábitat de especies amenazadas puede ser un factor de decisión para la ejecución de proyecto y/o de la toma de medidas necesarias. Cuando el proyecto se ha puesto en ejecución deben hacerse monitoreos para revisar que las condiciones de las especies en riesgo no se afecten negativamente por causa de la actividad.

Recursos: Información oficial sobre especies en alguna condición de amenaza, información espacial sobre los hábitats y equipos de profesionales para la identificación de las especies con potencial de ser afectadas por la realización de una actividad. Información oficial de los institutos de investigación biológica *Alexander von Humboldt*, *José Benito Vives de Andreis*, *Invemar*, *SINCHI*, *Jhon von Neumann*, *Instituto de ciencias de la Universidad Nacional de Colombia*, entre otros.

¹⁵ <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/ODM/321HM-Numero-de-especies-en-alguna-categoria-de-amenaza-4.pdf>

Periodicidad: Debe hacerse una revisión inicial que dé cuenta del estado de las especies en relación con su categoría de amenaza en la zona de análisis y posteriormente hacerse identificaciones anuales, contrastando con la información oficial de niveles de amenaza para actualizar el índice en el área de influencia de la actividad.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Información espacial, identificaciones en campo, información oficial.

101. Porcentaje de infestación de especies invasoras

Objetivo: Las especies invasoras se definen como aquellas especies, subespecies o taxón inferior e híbrido que se encuentra fuera de su distribución natural, pasada o presente, incluyendo cualquier parte, gametos, semillas, huevo o propágulos, que se establecen (reproducen exitosamente y tiene una población viable) y dispersan en ecosistemas o hábitats naturales o seminaturales; además, son agentes de cambio y causan impactos ambientales, económicos o de salud pública (Baptiste et al. 2010 citado por Mora Goyes et al., 2015).

Las especies invasoras se caracterizan por encontrarse fuera de su área natural de distribución y representan amenazas para las especies locales en diferentes niveles: genético, de la especie, para la población, comunidades y ecosistemas. Debido a que pueden presentar ventajas con respecto a las especies nativas al no encontrar depredadores naturales, pueden generar desequilibrios importantes en los ecosistemas (CNAP et al., 2012).

El indicador de porcentaje de infestación de especies invasoras mide la cantidad de especies invasoras que se encuentran en un territorio en relación al total de especies muestreadas, dentro de un grupo taxonómico (anfibios, aves, invertebrados, mamíferos, peces, plantas y reptiles).

Definición:

$$IEII_{GT} = \frac{EII_{GT}}{ETM_{GT}} \times 100$$

Donde:

$IEII_{GT}$: Porcentaje de infestación de especies invasoras en un grupo taxonómico

EII_{GT} : Número de especies invasoras de la muestra dentro de un grupo taxonómico

ETM_{GT} : Número de total de especies de la muestra dentro de un grupo taxonómico

La interpretación de este índice se realiza de acuerdo con la Tabla 84.

Tabla 84. Interpretación del porcentaje de infestación de especies invasoras e introducidas por grupo taxonómico

Porcentaje de infestación de especies invasoras e introducidas por grupo taxonómico	Nivel de infestación
0% – 20%	Muy bajo
21% – 40%	Bajo
41% – 60%	Medio
61% – 80%	Alto
81 – 100%	Muy alto

Por supuesto, estos niveles más que representar niveles positivos o negativos con respecto a la incidencia en el ecosistema afectado, representan medidas para la gestión urgente, incluso desde los primeros niveles de infestación para impedir la propagación y establecer medidas de control.

Responsabilidad: Actividades que hagan uso de especies biológicas, tengan procesos de importación o exportación que puedan ser potenciales espacios de transporte para las especies, o que por su naturaleza puedan generar traslado de especies desde diferentes contextos a ecosistemas locales en donde puedan convertirse en invasoras o introducidas.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies de los diferentes grupos taxonómicos.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Mediciones e identificaciones en campo.

Índices de diversidad

La diversidad de comunidades bióticas se refiere a la variabilidad dentro de las especies, entre las especies y entre grupos comparativos; estando determinada por la riqueza, uniformidad o equidad, y la abundancia (MADS, 2012; Roldán-Pérez, 2016). A continuación, se presentan los índices de diversidad que son empleados con mayor frecuencia para la flora y la fauna.

Índices de diversidad alfa

102. Índice de Margalef

Objetivo: Este índice mide la densidad de las especies, suponiendo una relación funcional, entre el número de especies y el número total de individuos, estimando la diversidad de una comunidad biótica de acuerdo con la distribución numérica de los individuos de diferentes especies en la muestra que se analiza (Figuerola, 2014).

Definición:

$$D_{mg} = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Donde:

D_{mg} : Diversidad de Margalef

S : Número de especies

N : Número total de individuos

Para interpretar los resultados del índice se revisan los rangos y las categorías asociados según la Tabla 85.

Tabla 85. Interpretación del índice de diversidad Margalef

Rango del índice	Categoría
<1	Muy baja diversidad
>1 – 2	Baja diversidad

Rango del índice	Categoría
>2 – 2.7	Diversidad media
>2.7 – 3	Alta diversidad
>3	Muy alta diversidad

Fuente: Figueroa (2014)

Es importante considerar que el índice puede ser igual para dos comunidades, si por ejemplo, en una comunidad -hipotética- con dos especies, una es muy abundante y la otra muy escasa, y en otra comunidad se presenta exactamente lo contrario (con las abundancias) para las mismas dos especies. En este caso el valor del índice será el mismo, por lo que no permitirá apreciar las diferencias en las abundancias individuales de las especies que se encuentran en cada una de las dos comunidades. Finalmente D_{mg} será igual a cero (0) cuando existe una sola especie en el área de estudio (Villarreal et al., 2004).

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad biótica de una comunidad.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizado desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreado en tanto se introduzcan actividades que puedan incidir en la modificación de las condiciones de referencia.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

103. Índice de Simpson (λ)

Objetivo: El índice Simpson representa la dominancia o la representatividad de determinadas especies, siendo calculado como la probabilidad de que dos individuos tomados al azar en una muestra pertenezcan a la misma especie (Figueroa, 2014).

Definición:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n p_i^2$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \frac{n_i^2}{N^2}$$

De forma alternativa se puede calcular como:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \left[\frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \right]$$

Donde:

- λ : Diversidad de Simpson
- p_i : Abundancia proporcional de la especie i , expresada como el número de individuos de la especie i dividido entre el número total de individuos de la muestra.
- n_i : Número de individuos de la especie i
- N : Número de individuos totales de la muestra

Este índice se encuentra fuertemente influenciado por las especies más dominantes (Villarreal et al., 2004). La interpretación de los resultados se realiza de acuerdo con la Tabla 86

Tabla 86. Interpretación del índice de diversidad Simpson

Rango del índice	Categoría
0 - 0.5	Muy baja diversidad o muy alta dominancia
>0.5 – 0.7	Baja diversidad o alta dominancia
>0.7 – 0.8	Diversidad y dominancia media
>0.8 – 0.9	Alta diversidad o baja dominancia
>0.9 – 1	Muy alta diversidad o muy baja dominancia

Fuente: Figueroa (2014)

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad de una comunidad biótica.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreado en tanto se introduzcan actividades que puedan incidir en la modificación de las condiciones referenciales.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

104. Serie de números de Hill

Objetivo: Este indicador fue propuesto por Hill, en 1973, con el propósito de solventar los inconvenientes que se generan por la heterogeneidad en las unidades en las que se expresan los diferentes índices de diversidad, para lo cual planteó realizar transformaciones matemáticas a los índices de diversidad existentes, presentando la denominada serie de números de diversidad o *Serie de números de Hill*. Éstos miden el número efectivo de especies presentes en una muestra, por lo que representan una medida del grado de distribución de las abundancias relativas entre las especies.

Por la forma en la que se calculan los números de Hill, a medida que aumenta el número de especies, las más raras tienen menos peso en la muestra y se obtienen valores más bajos de N_1 y N_2 . Hill también propuso la razón entre N_2 y N_1 como un índice de equidad, que a diferencia de otros índices para esta característica, prácticamente no es afectado por la riqueza de especies (Villarreal et al., 2004).

Definición:

Los números de Hill se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$N_0 = S$$

$$N_1 = e^{H'} = \exp\left(\sum p_i (-\log p_i)\right)$$

$$N_2 = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\sum p_i^2}$$

Donde:

- N_0 : Número total de especies de la muestra
- N_1 : Número de especies abundantes en la muestra
- N_2 : Número de especies muy abundantes en la muestra
- S : Número total de especies
- p_i : Abundancia proporcional de la especie i , expresada como el número de individuos de la especie i dividido entre el número total de individuos de la muestra.
- H' : Índice de Shannon-Weiner
- λ : Índice de Simpson

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por los proyectos, obras o actividades que tengan incidencia sobre la biodiversidad.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreada en tanto se introduzcan actividades que puedan modificar las condiciones iniciales de manera significativa.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

Índices de equidad

105. Índice de Shannon-Wiener (H')

Objetivo: Este índice asume que todas las especies están representadas en las muestras y que todos los individuos fueron muestreados al azar. Puede adquirir valores entre cero (0) cuando hay una sola especie y el logaritmo de S cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos. Puede verse fuertemente influenciado por las especies más abundantes (Villareal et al., 2004).

Definición:

$$H' = - \sum p_i \times \ln p_i$$

$$\sum p_i = 1$$

Donde:

p_i : Abundancia proporcional de la especie i , calculada como el número de individuos de la especie i dividido entre el número total de individuos de la muestra.

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por los proyectos, obras o actividades que tengan incidencia sobre la biodiversidad.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreada en tanto se introduzcan actividades que puedan modificar las condiciones iniciales de manera significativa.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

106. Índice de Pielou

Objetivo: Relaciona la diversidad observada y el máximo valor de diversidad esperado. Toma valores entre cero (0) y uno (1), cuando todas las especies presentan la misma abundancia (Villarreal et al., 2004).

Definición:

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}}$$
$$H'_{max} = \ln(S)$$

Donde:

J' : Índice de Pielou
 H'_{max} : Índice de Shannon-Wiener
 S : Número de especies

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por los proyectos, obras o actividades que tengan incidencia sobre la biodiversidad.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreada en tanto se introduzcan actividades que puedan modificar las condiciones iniciales de manera significativa.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

107. Índice de Brillouin

Objetivo: Este índice es empleado cuando toda la población ha sido censada, por lo cual describe una colección de datos conocida (Villarreal et al., 2004). Se puede calcular mediante dos ecuaciones que se incluyen a continuación.

Definición:

$$(I) \quad HB = \frac{\ln N! - \sum \ln N_i!}{N}$$

Donde:

N : Número total de individuos
 N_i : Número total de individuos de la especie i

$$(II) \quad HB = \left[\frac{1}{N} \right] \times \ln \frac{N!}{N_a! \times N_b! \times N_s!}$$

Donde:

N : Número total de individuos
 N_a : Número de individuos de la especie a
 N_b : Número de individuos de la especie b
 N_s : Número de individuos de la última especie considerada

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por los proyectos, obras o actividades que tengan incidencia sobre la biodiversidad.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreada en tanto se introduzcan actividades que puedan modificar las condiciones iniciales de manera significativa.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

108. Equidad de Brillouin

Objetivo: Este indicador se obtiene a partir del valor del índice de Brillouin y representa una medida de la equidad o equitatividad de la biodiversidad.

Definición:

$$E = \frac{HB}{Hb_{max}}$$

$$Hb_{max} = \left[\frac{1}{N} \right] \times \ln \frac{N!}{\left(\left[\frac{N}{S} \right] ! \right)^{s-r} \times \left\{ \left(\left[\frac{N}{S} \right] + 1 \right) ! \right\}^r}$$

Donde:

- S : Número de especies
 N : Número total de individuos
 $\left[\frac{N}{S} \right]$: Siendo la integral de N/S
 r : $N-S [N/S]$

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por los proyectos, obras o actividades que tengan incidencia sobre la biodiversidad.

Recursos Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreada en tanto se introduzcan actividades que puedan modificar las condiciones iniciales de manera significativa.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

Diversidad beta

A diferencia de las diversidades alfa y gamma que pueden ser medidas en función del número de especies presentes en un territorio, la diversidad beta (o diversidad entre hábitats) hace referencia al grado de reemplazamiento de especies o cambio biótico a través de gradientes ambientales complejos o de diferentes patrones locales (Calderón-Patrón et al., 2012). Su medición está basada en proporciones o diferencias que pueden evaluarse con base en índices o coeficientes de similitud, de disimilitud o de distancia entre las muestras, a partir de datos cualitativos (como presencia o ausencia de especies), cuantitativos (como la abundancia proporcional de cada especie, medida en función de individuos, biomasa, densidad, cobertura, etc.) o con índices diseñados específicamente para este fin (C. Moreno, 2001). A continuación se presenta un conjunto de indicadores de uso reconocido para la evaluación de la diversidad beta.

109. Índice de Jaccard

Objetivo: El índice Jaccard mide la diversidad Beta teniendo en cuenta las especies compartidas en dos muestras, tomadas de diferentes ecosistemas o sitios de interés (Figuerola, 2014). Sus resultados varían desde cero (0) cuando no hay especies compartidas entre ambos sitios, hasta uno (1) cuando los dos sitios tienen la misma composición de especies (C. Moreno, 2001).

Definición:

$$I_j = \frac{c}{(a + b - c)}$$

Donde:

- I_j : Índice de Jaccard
 a : Número de especies del ecosistema A
 b : Número de especies del ecosistema B
 c : Número de especies compartidas por los grupos de análisis

Para la interpretación, se considera que entre menor sea la semejanza entre ecosistemas (o grupos de análisis) mayor será la diversidad Beta como se muestra en la Tabla 87.

Tabla 87. Interpretación del índice de diversidad Jaccard

Rango del índice	Categoría
0 – 0.2	Muy baja semejanza
>0.2 – 0.4	Baja semejanza
>0.4 – 0.6	Semejanza media
>0.6 – 0.8	Alta semejanza
>0.8 - 1	Muy Alta semejanza

Fuente: Figueroa (2014)

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad biótica de varios ecosistemas. Puede ser por tanto un índice sectorial o de proyectos lineales de gran extensión.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizado desde una medida de referencia o línea base del sistema de los ecosistemas A y B a comparar, y luego debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades con potencial de modificación de la diversidad.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

110. Índice de Sorencen o de Czekanowski (coeficiente de similitud-cualitativo)

Objetivo: Este índice evalúa la diversidad Beta mediante la valoración de la similitud o disimilitud entre diferentes grupos de análisis (Figueroa, 2014). Para su cálculo se relaciona el número de especies en común, con la media aritmética de las especies presentes en los dos sitios de interés (C. Moreno, 2001). El resultado varía entre cero (0) cuando no hay especies comunes en los dos sitios de interés y uno (1) cuando las especies son las mismas en ambos lugares.

Definición:

$$I_s = \frac{2c}{(a + b)}$$

Donde:

- I_s : Índice de Sorencen
 a : Número de especies del ecosistema A

- b*: Número de especies del ecosistema B
c: Número de especies compartidas por los grupos de análisis

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad biológica. Puede ser, en este sentido, un índice sectorial o de proyectos lineales o de gran extensión cuya área de influencia sobre el medio biótico aborde diferentes ecosistemas.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizado desde una medida de referencia o línea base de los ecosistemas A y B a comparar, y luego debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades con potencial de modificación de la diversidad.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

111. Índice de Sorensen (coeficiente de similitud-cuantitativo)

Objetivo: Es muy similar al coeficiente de similitud de Sorensen para datos cualitativos, sin embargo en este caso no se calcula con el número de especies presentes sino con sus abundancias (Villarreal et al., 2004).

Definición:

$$I_{Scuant} = \frac{2_p N}{aN + bN}$$

Donde:

- aN*: Número total de individuos en el sitio A
bN: Número total de individuos en el sitio B
pN: Sumatoria de la abundancia más baja de cada una de las especies compartidas entre ambos sitios

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad biológica. Puede ser, en este sentido, un índice sectorial o de proyectos lineales o de gran extensión cuya área de influencia sobre el medio biótico aborde diferentes ecosistemas.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizado desde una medida de referencia o línea base de los ecosistemas A y B a comparar, y luego debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades con potencial de modificación de la diversidad.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

112. Índice de Sokal y Sneath

Objetivo: Este índice relaciona el número de especies comunes en los dos ecosistemas o sitios de interés, con las especies presentes de manera exclusiva en cada uno de ellos. Toma el valor de uno (1) cuando todas las especies son compartidas y cero (0) cuando no hay especies comunes.

Definición:

$$I_{ss} = \frac{c}{2(a + b + c) - c}$$

Donde:

- I_{ss} : Índice de Sokal y Sneath
- a : Número de especies presentes solamente en el ecosistema A
- b : Número de especies presentes solamente en el ecosistema B
- c : Número de especies compartidas por los grupos de análisis

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad biológica. Puede ser, en este sentido, un índice sectorial o de proyectos lineales o de gran extensión cuya área de influencia sobre el medio biótico aborde diferentes ecosistemas.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizado desde una medida de referencia o línea base de los ecosistemas A y B a comparar, y luego debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades con potencial de modificación de la diversidad.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

113. Índice de Morisita-Horn

Objetivo: Este índice está fuertemente influido por la riqueza de especies y el tamaño de las muestras, y tiene la desventaja de que es altamente sensible a la abundancia de la especie más abundante (C. Moreno, 2001; Villarreal et al., 2004).

Definición:

$$I_{M-H} = \frac{2 \sum (a n_i \times b n_j)}{(da + db) a N \times b N}$$
$$da = \frac{\sum a n_i^2}{a N^2}$$
$$db = \frac{\sum b n_j^2}{b N^2}$$

Donde:

an_i : Número de individuos de la i -ésima especie en el sitio A

bn_j = Número de individuos de la j -ésima especie en el sitio B

aN = Número total de individuos en el sitio A

bN = Número total de individuos en el sitio B

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad biológica. Puede ser, en este sentido, un índice sectorial o de proyectos lineales o de gran extensión cuya área de influencia sobre el medio biótico aborde diferentes ecosistemas.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizado desde una medida de referencia o línea base de los ecosistemas A y B a comparar, y luego debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades con potencial de modificación de la diversidad.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

114. Índice de Whittaker

Objetivo: Whittaker propuso en 1972, describir la diversidad gamma (γ) como la integración de las diversidades beta (β) y alfa (α), por lo que la diversidad beta puede calcularse como la relación γ/α . Este índice ha probado ser el más robusto para medir el reemplazo entre comunidades (C. Moreno, 2001; Villarreal et al., 2004).

Definición:

$$\beta = \frac{S}{\alpha - 1}$$

Donde:

β : Beta

S : Número de especies registradas en un conjunto de muestras (diversidad gamma)

α : Número promedio de especies en las muestras (alfa promedio)

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad biológica. Puede ser, en este sentido, un índice sectorial o de proyectos lineales o de gran extensión cuya área de influencia sobre el medio biótico aborde diferentes ecosistemas.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizado desde una medida de referencia o línea base de los ecosistemas A y B a comparar, y luego debe ser monitoreado cuando se introduzcan actividades con potencial de modificación de la diversidad.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

115. Índice de Shannon

Objetivo: Este índice de diversidad mide la heterogeneidad de una comunidad biótica y tiene en cuenta la abundancia y que tan uniformemente están distribuidas las especies. Los valores máximos indican que la especie es igualmente abundante (Figueroa, 2014).

Definición:

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i)$$

$$p_i = \frac{n_i}{N}$$

Donde:

- H' : Diversidad de Shannon
- p_i : Abundancia relativa de la especie i con respecto al total de las especies
- n_i : Número de individuos de la especie i
- N : Número de individuos de una comunidad

En la Tabla 88 se define los rangos de análisis del índice según niveles de biodiversidad.

Tabla 88. Interpretación del índice Shannon

Rango del índice	Categoría
>1.0	Muy baja diversidad
>1.0 – 1.8	Baja diversidad
>1.8 – 2.1	Diversidad media
>2.1 – 2.3	Alta diversidad
>2.3	Muy alta diversidad

Fuente: Figueroa (2014)

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad de una comunidad biótica.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreado en tanto se introduzcan actividades que puedan incidir en la modificación de la diversidad de referencia.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificaciones en campo.

116. Índice de Bray y Curtis

Objetivo: Este índice permite determinar la abundancia de especies, comparándola en dos o más lugares donde se pretenda ejecutar algún proyecto, obra o actividad.

Definición:

$$I_{BC} = 1 - \frac{\sum(X_i - Y_i)}{\sum(X_i + Y_i)}$$

Donde:

I_{BC} : Índice de Bray y Curtis
 X_i : Abundancia o densidad de especies i en un sitio 1
 Y_i : Abundancia o densidad de especies i en un sitio 2

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad de una comunidad biótica.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreado en tanto se realicen actividades que puedan incidir en la modificación de la diversidad de referencia.

Nivel de referencia: Ecosistemas en condiciones similares a las que se presentaban antes del inicio o la implementación del proyecto, obra o actividad sujeta a licencia ambiental.

Puntos de lectura: Sitios seleccionados donde se llevará a cabo el proyecto, obra o actividad.

117. Índice de Cody

Objetivo: Este índice tiene un efecto aditivo entre sus componentes pero no es independiente de la riqueza de especies (C. Moreno, 2001). Frecuentemente se evalúa teniendo en cuenta el gradiente del más "pobre" hacia el más rico en especies. Sin embargo es necesario saber cómo se están relacionando las comunidades en ese gradiente para obtener resultados biológicos (Villarreal et al., 2004). Se puede calcular de dos formas diferentes.

Definición:

$$(I) \quad \beta = \frac{g(H) + p(H)}{2}$$

Donde:

$g(H)$: Número de especies ganadas a través de un gradiente de comunidades
 $p(H)$: Número de especies perdidas a través del mismo gradiente

$$(II) \quad \beta = 1 - \frac{c(a+b)}{2ab}$$

Donde:

- a*: Número de especies en el sitio A
- b*: Número de especies en el sitio B
- c*: Número de especies presentes en ambos sitios A y B, es decir que están compartidas

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad de una comunidad biótica.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreado en tanto se realicen actividades que puedan incidir en la modificación de la diversidad de referencia.

Nivel de referencia: Ecosistemas en condiciones similares a las que se presentaban antes del inicio o la implementación del proyecto, obra o actividad sujeta a licencia ambiental.

Puntos de lectura: Sitios seleccionados donde se llevará a cabo el proyecto, obra o actividad.

118. Índice de Magurran

Objetivo: Con este índice el valor de la diversidad beta aumenta conforme el número de especies en los dos sitios aumenta y también cuando se vuelven más diferentes.

Definición:

$$\beta = (a + b) (1 - I_j)$$

Donde:

- I_j*: Similitud entre los sitios A y B medida con el índice de Jaccard
- a*: Número de especies en el sitio A
- b*: Número de especies en el sitio B

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad de una comunidad biótica.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreado en tanto se realicen actividades que puedan incidir en la modificación de la diversidad de referencia.

Nivel de referencia: Ecosistemas en condiciones similares a las que se presentaban antes del inicio o la implementación del proyecto, obra o actividad sujeta a licencia ambiental.

Puntos de lectura: Sitios seleccionados donde se llevará a cabo el proyecto, obra o actividad.

119. Índice de complementariedad

Objetivo: Medir la diversidad en la composición de las especies, que se encuentran en el lugar donde se realizará un proyecto, obra o actividad (Escalante & Morrone, 2002). La complementariedad varía desde cero, cuando ambos sitios son idénticos en composición de especies, hasta uno, cuando las especies de ambos sitios son completamente distintas (C. Moreno, 2001)

Definición: Para obtener el valor de complementariedad se deben primero realizar 2 cálculos:

La riqueza total para ambos sitios combinados:

$$S_{AB} = a + b - c$$

Donde:

- a: Número de especies del sitio A
- b: Número de especies del sitio B
- c: Número de especies en común entre los sitios A y B.

II. El número de especies únicas a cualquiera de los dos sitios:

$$U_{AB} = a + b - 2c$$

Donde:

- a: Número de especies del sitio A
- b: Número de especies del sitio B
- c: Número de especies en común entre los sitios A y B.

A partir de estos valores calculamos la complementariedad de los sitios A y B como:

$$C_{AB} = \frac{U_{AB}}{S_{AB}}$$

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad de una comunidad biótica.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreado en tanto se introduzcan actividades que puedan incidir en la modificación de la diversidad de referencia.

Nivel de referencia: Ecosistemas en condiciones similares a las que se presentaban antes del inicio o la implementación del proyecto, obra o actividad sujeta a licencia ambiental.

Puntos de lectura: Sitios seleccionados donde se llevará a cabo el proyecto, obra o actividad.

Diversidad gamma

120. Índice Gamma (γ)

Objetivo: Este índice, propuesto por Schluter y Ricklefs en 1993, evalúa la diversidad gamma (γ), expresándola como el número de especies, pero relacionando la diversidad alfa (α) y beta (β), y cuántas comunidades están tenidas en cuenta en el análisis (Villarreal et al., 2004).

Definición:

$$\gamma = \alpha \times \beta \times D$$

$$\beta = \frac{1}{N_c}$$

Donde:

- α : Diversidad alfa promedio = número promedio de especies en una comunidad
- β : Diversidad beta = inverso de la dimensión específica
- N_c : Número promedio de comunidades ocupadas por una especie
- D : Dimensión de la muestra = número total de comunidades

Responsabilidad: Este índice debe ser medido y monitoreado por las actividades que tienen incidencia en la diversidad de una comunidad biótica.

Recursos: Equipos de profesionales del medio biótico (biólogos, ecólogos, ingenieros forestales o agrónomos, entre otros) para la identificación biológica de especies botánicas y faunísticas.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base de una comunidad biótica y luego debe ser monitoreado en tanto se introduzcan actividades que puedan incidir en la modificación de la diversidad de referencia.

Nivel de referencia: Área de influencia sobre el medio biótico.

Puntos de lectura: Identificación en campo

MEDIO SOCIOECONÓMICO

Componente demográfico

121. Variación poblacional

Objetivo: La variación poblacional es el resultado de diversos factores que inciden en el cambio de la demografía de un territorio determinado. Dentro de los dinamizantes que dan origen a los cambios poblacionales se encuentran las condiciones de vida de la población, factores económicos, acceso y nivel de educación, dinámicas del mercado laboral, el orden público y condiciones de salud pública, entre otras (DANE,

2012a). Debido a esto, las variaciones no se limitan a valores, sino que deben ser acompañados de descripciones u otros indicadores que permitan comprender los procesos que dan origen a las dinámicas poblacionales.

Definición:

$$\Delta P = \frac{P_t - P_{t-1}}{P_{t-1}} \times 100$$

Donde:

ΔP : Variación poblacional

P_t : Población del tiempo t de referencia, en donde cuenta la población permanente, se suma los nacimientos y las migraciones, y se resta las defunciones y emigraciones.

P_{t-1} : Población del tiempo t – 1, en donde cuenta la población permanente, se suma los nacimientos y las migraciones, y se resta las defunciones y emigraciones de ese periodo.

Responsabilidad: POA que por sí mismas y/o por sus cadenas productivas -directas e indirectas- generen modificaciones en la población local.

Recursos: Información oficial

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Municipio o región del área de influencia

Puntos de lectura: Unidades territoriales definidas como área de influencia del medio socio-económico.

122. Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)

Objetivo: Este índice es una alternativa para definir e identificar los hogares en condiciones de pobreza, considerando diversos aspectos que no se limitan al ingreso de recursos económicos del hogar. Se entiende como necesidades básicas a aquellas variables que podrían garantizar condiciones mínimas de vida a los hogares y que de lo contrario significaría o se presumiría condiciones de pobreza (DANE, 2012b; Mancero & Feres, 2001).

Definición:

$$\%PNBI = \frac{PNBI}{P_T}$$

Donde:

$\%PNBI$: Porcentaje de hogares de la región de referencia o zona de estudio que tiene necesidades básicas insatisfechas.

$PNBI$: Hogares con necesidades básicas insatisfechas en la región de referencia o zona de estudio.

P_T : Hogares totales en la región de referencia o zona de estudio.

Para estimar el número de hogares con necesidades básicas insatisfechas se parte de la indagación de diferentes variables que contienen información sobre las necesidades básicas como se muestra en la Tabla 89.

Tabla 89. Variables de análisis para la estimación de las Necesidades Básicas Insatisfechas.

Necesidades básicas	Dimensiones	Variables censales
Acceso a la vivienda	Estado de la vivienda	• Materiales de construcción utilizados en piso, paredes y techo
	Hogares con hacinamiento	• Número de personas en el hogar • Número de cuartos de la vivienda
Acceso a servicios sanitarios	Disponibilidad de agua potable	• Fuente de abastecimiento de agua en la vivienda.
	Tipo de sistema sanitario	• Disponibilidad del servicio sanitario. • Sistema de eliminación de excretas
Capacidad económica	Probabilidad de suficiencia de ingresos del hogar	• Edad de los miembros del hogar • Último nivel educativo aprobado • Número de personas en el hogar • Condición de actividad
Acceso a la educación	Asistencia o inasistencia escolar	• Edad de los miembros del hogar • Asistencia a un establecimiento educativo

Fuente: Mancero & Feres (2001)

Al final la calificación del índice es una variable dicotómica que puede asumir o bien 0 si el hogar satisface sus necesidades básicas o 1 cuando el hogar no satisface sus necesidades básicas. La clasificación parte de la premisa de que si un hogar no cumple con al menos una de las necesidades básicas, asume el valor de 1 y se presume condiciones de pobreza y 0 si las cumple todas (Mancero & Feres, 2001).

Responsabilidad: Actividades que puedan influenciar en las condiciones de vida de los hogares en una determinada región deben asumir como línea base los estudios preliminares del DANE. A partir de estos debe hacer seguimiento a los cambios que el índice pueda tener en relación con el ejercicio mismo de la actividad y a los compromisos adquiridos con las autoridades ambientales.

Recursos: Información oficial.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Región o área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Unidades territoriales definidas como área de influencia del medio socio-económico.

123. Tasa de mortalidad infantil

Objetivo: La tasa de mortalidad infantil demuestra el nivel de nacimientos reales que perduran más de un año. Este índice permite dilucidar condiciones de bienestar o no bienestar de las madres, o incidencia de aspectos asociados a la salud que pueda beneficiar o afectar los nacimientos (como la presencia de determinadas sustancias) (DANE, 2012b).

Definición:

$$TMI = \frac{DM1}{TNV} \times 1000$$

Donde:

TMI: Tasa de mortalidad infantil.

DM1: Defunciones de menores de un año.

TNV: Total nacidos vivos.

Responsabilidad: Las actividades que por cuyas características puedan incidir en el bienestar de las madres gestantes o en los recién nacidos debido a registros históricos y en la literatura que indique esta posibilidad.

Recursos: Información oficial de nacimientos y mortalidad infantil

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Municipio, región o unidad administrativa del área de influencia.

Puntos de lectura: Unidades territoriales definidas como área de influencia del medio socio-económico.

124. Índice de nivel de conflicto ambiental

Objetivo: Los conflictos ambientales son situaciones en las que surgen tensiones entre diferentes actores a partir de escenarios de confrontación, disputa, debate, discusiones y oposiciones en diferentes escalas (local, nacional, regional y global) por apropiación, despojo, contaminación, dominio, transformación, generación de efectos e impactos sobre bienes naturales y su efecto social (ambiental) (Ortega-Guerrero, 2018). Por supuesto, debido a que los conflictos ambientales son situados, estos pueden ser un factor de medición de los efectos en las comunidades locales con respecto a la implementación de determinadas actividades.

Definición:

$$NCT = NC / AI$$

Donde:

NCT: Número de conflictos territoriales

NC/AI: Número de conflictos emergentes en el área de influencia

Responsabilidad: Actividades que desde la expectativa de implementación generan tensiones con respecto a los intereses de los habitantes locales y cuando la historia regional ha estado marcada por la incidencia de conflictos ambientales.

Recursos: Equipos de profesionales para la identificación de conflictos ambientales y fuentes oficiales de seguimiento de conflictos.

Periodicidad: El análisis debe ser evaluado antes de iniciar los procesos de expectativa sobre las posibles nuevas actividades a implementar, para establecer un marco referencial de conflictos ambientales territoriales. Posteriormente, este análisis debe realizarse cuando las poblaciones locales tienen conocimiento de la actividad para dilucidar la emergencia de nuevos conflictos.

En el caso de que la actividad esté en curso, se deben evaluar el número de conflictos territoriales en el área de influencia anualmente.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Información oficial de conflictos y levantamiento de información en campo.

Componente espacial

125. Cobertura de servicios sociales

Objetivo: Los servicios sociales son aquellos que buscan el bienestar de la población que no son necesariamente indispensables para garantizar su vida, pero que aportan condiciones de dignidad y de desarrollo humano (individual y colectivamente) (Aguilar Idáñez, 2014). Para efectos del indicador se consideran los siguientes servicios sociales: (1) educación, (2) vivienda, (3) recreación, (4) transporte público y (5) acceso a internet. Por supuesto, el indicador debe ser aplicado para cada servicio por aparte pues la unidad de referencia que permite la comparación (personas u hogares) es diferente en cada caso.

Definición:

$$CSS_{ij} = \frac{PS_{ij}}{P_{Tj}}$$

Donde:

CSS_{ij} : Cobertura del servicio social tipo j del grupo de acumulación de referencia tipo i . Los grupos de acumulación de referencia pueden ser diferentes por tipo de servicio, pues cada uno puede afectar de manera grupal o individual según el caso.

PS_{ij} : Población del grupo de referencia tipo i que tiene acceso al servicio social j

P_{Tj} : Población o unidades totales del grupo de referencia tipo i .

i : Cada uno de los servicios públicos sociales (Tabla 90).

j : Cada uno de los grupos de referencia (hogares o individuos) (Tabla 90).

Tabla 90. Relación entre servicios sociales tipo j y las unidades de referencia tipo i

Servicio social (j)	Descripción	Población o unidad de referencia (i)
Educación básica y media	Acceso a educación a personas entre 6 y 17 años	Número de personas entre 6 y 17 años
Educación superior	Acceso a educación superior para personas mayores de 17 años en sus diferentes modalidades.	Número de personas mayores a 17 años
Vivienda	Acceso a la vivienda bien sea propia o en arriendo	Número de personas
Recreación	Acceso a espacios o actividades de esparcimiento que no estén relacionadas con la actividad laboral, académica o deportiva.	Número de personas
Deporte	Acceso a espacios o actividades deportivas y de acondicionamiento físico.	Número de personas
Transporte público	Fácil acceso al servicio de transporte público en términos del tiempo de acceso y la distancia desde los lugares de residencia.	Número de personas
Acceso a Internet	Acceso a internet de manera fácil y continua	Número de personas

Fuente: elaboración propia

Por otra parte, el seguimiento entre periodos de análisis se da a partir de funciones de cambio que puedan dar cuenta la incidencia -o falta de ella- de políticas públicas o actividades que influyeran el acceso o no a los servicios sociales en un rango de tiempo determinado.

$$\Delta CSS_{ij} = \frac{CSS_{ijt} - CSS_{ijt-1}}{CSS_{ijt-1}} \times 100$$

Donde:

ΔCSS_{ij} : Cambio en los niveles de cobertura de los servicios sociales tipo i

CSS_{ijt} : Cobertura de servicios sociales i del tiempo t de análisis

CSS_{ijt-1} : Cobertura de servicios sociales del tiempo t-1

Responsabilidad: Actividades que por su presencia en el área de influencia puedan modificar positiva o negativamente el acceso a los diferentes servicios sociales.

Recursos: Grupos de trabajo social para labores en campo y análisis de la información recopilada

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Levantamiento de información en campo

126. Cobertura de servicios de salud

Objetivo: La cobertura de los servicios de salud está definida por la capacidad de la población para buscar y obtener atención cuando lo requieran y de manera oportuna (Ministerio de Salud y Protección Social, 2005). A partir de esta premisa, se define el indicador como la relación entre el número de personas que acceden al servicio de salud y el total de personas en un área geográfica definida.

Definición:

$$CSSa = \frac{PSSa}{P_T}$$

Donde:

$CSSa$: Cobertura del servicio de salud

$PSSa$: Población que tiene acceso al servicio de salud

P_T : Población total

Por otra parte, el seguimiento entre periodos de análisis se da a partir de funciones de cambio que puedan dar cuenta la incidencia o falta de ella de políticas públicas o actividades que influyen el acceso o no a los servicios de salud entre periodos de análisis.

$$\Delta CSSa = \frac{CSSa_t - CSSa_{t-1}}{CSSa_{t-1}} \times 100$$

Donde:

$\Delta CSSa$: Cambio en los niveles de cobertura del servicio de salud

$CSSa_t$: Cobertura del servicio de salud en el tiempo t de análisis

$CSSa_{t-1}$: Cobertura del servicio de salud en el tiempo t-1

Responsabilidad: Actividades que por su presencia en el área de influencia puedan modificar positiva o negativamente el acceso al servicio de salud.

Recursos: Información estadística de demografía y salud.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia.

Puntos de lectura: Levantamiento de información en campo.

127. Índice de cobertura de servicios públicos domiciliarios

Objetivo: Los servicios públicos domiciliarios suplen necesidades esenciales de la población y, por lo tanto, impactan sus niveles de bienestar al afectar aspectos asociados a la calidad y dignidad de la vida, e incluso la misma existencia (Matías, 2015). Según el DANE (2012b), los servicios públicos básicos son: (1) la conexión con el acueducto, (2) el alcantarillado, (3) la energía eléctrica, (4) los servicios de telecomunicaciones y (5) la gestión de residuos sólidos. Por supuesto, al tratarse de servicios vitales, el objetivo principal es proporcionar una cobertura del 100% de cada uno de ellos.

La prestación de cada uno de estos servicios tiene características espaciales particulares que pueden, por una parte, limitar el acceso y en ese sentido implicar esfuerzos considerables para lograr mayores coberturas. Por otra parte, servicios como el acueducto puede depender de las características propias del lugar de análisis como es el caso del contraste entre los espacios urbanos y rurales (DANE, 2012b).

Este índice es una relación entre la población que cuenta con acceso a los servicios públicos domiciliarios y la población total. Su cálculo y monitoreo permite estudiar el impacto de la gestión pública y/o de los proyectos o actividades que puedan incidir en la dinámica social local.

Definición:

$$CSP_i = \frac{PS_i}{P_T}$$

Donde:

CSP_i : Cobertura del servicio público domiciliario i

PS_i : Población que tiene acceso al servicio público i en una zona de análisis (población, región, departamento, entre otras).

P_T : Población total.

i : Cada uno de los servicios públicos domiciliarios (la conexión con el acueducto, el alcantarillado, la energía eléctrica, los servicios de telecomunicaciones y la gestión de residuos sólidos).

Por otra parte, el seguimiento entre periodos de análisis se da a partir de funciones de cambio que puedan dar cuenta de la incidencia -o falta de ella- de políticas públicas o actividades que influyencien el acceso a los servicios públicos domiciliarios, en un rango de tiempo determinado.

$$\Delta CSP_i = \frac{CSP_{it} - CSP_{it-1}}{CSP_{it-1}} \times 100$$

Donde:

ΔCSP_i : Cambio en los niveles de cobertura del servicio público domiciliario i

CSP_{it} : Cobertura de servicios públicos domiciliarios del tiempo t de análisis

CSP_{it-1} : Cobertura de servicios públicos domiciliarios del tiempo t-1

Responsabilidad: Las actividades que tengan incidencia en las dinámicas sociales locales, bien sea porque afectan el acceso a los servicios públicos domiciliarios o porque mejoran las condiciones de éstos. Por su parte, las autoridades ambientales deben vigilar a partir de condiciones base registradas en las estadísticas nacionales, para evidenciar tanto los aumentos como los decrecimientos de cobertura en relación con la ejecución de actividades.

Recursos: Estadísticas nacionales como registros base y encuestas para los monitoreos.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Población, región, departamento, entre otras unidades territoriales cuya dinámica social pueda ser afectada por la implementación de actividades.

Puntos de lectura: Unidades territoriales definidas como área de influencia del medio socio-económico.

128. Índice de seguridad vial

Objetivo: Este índice está compuesto por los niveles de mortalidad y de generación de lesiones, en relación con 100.000 habitantes, y permite estimar la influencia de la introducción de nuevo tráfico de vehículos (asociado a la actividad a evaluar) en la accidentalidad de las vías que usa (Motos, 2019). En el caso de la actividad, el índice calcula los niveles de accidentalidad acusados por ella o que la involucren en relación con la población de referencia.

Definición:

$$ISV = \frac{(NM + NL)}{100.000}$$

Donde:

ISV : Índice de seguridad vial

NM : Número de muertes en accidentes de tránsito que involucren a la actividad

NL : Número de lesiones en accidentes de tránsito que involucren a la actividad

Responsabilidad: Actividades que requieran tránsito de mercancías, materias primas u otros que impliquen ocupación o deterioro de las vías.

Recursos: Información oficial de accidentalidad por vías y tramos e información cartográfica de las vías.

Periodicidad: Mensual

Nivel de referencia: Área de Influencia

Puntos de lectura: Información oficial de accidentalidad en el área de influencia

129. Índice de tiempos de movilidad

Objetivo: La congestión vial y por lo tanto las limitaciones a la movilidad se miden en función de la velocidad de recorrido en determinados tramos viales. Teniendo en cuenta el caso de las actividades que utilicen vías, su cálculo resulta de la velocidad media por vía y el impacto total es la sumatoria, donde el impacto surge de la verificación de los cambios al introducir un mayor tráfico de vehículos (Motos, 2019).

Definición:

$$ITM_i = \frac{D_{ref_i}}{T_{med_i}}$$

$$ITM_t = \sum_{i=1}^n \frac{D_{ref_i}}{T_{med_i}}$$

Donde:

ITM_i : Índice de tiempos de movilidad por vía tipo i ocupada (km/h)

ITM_t : Índice de tiempos de movilidad total por las vías utilizadas en la actividad

D_{ref_i} : Distancia de referencia de la vía i ocupada por la actividad

T_{med_i} : Tiempo medio de recorrido en la ruta tipo i

n : Número de vías ocupadas por la actividad

Responsabilidad: Actividades que requieran tránsito de mercancías, materias primas u otros que impliquen ocupación de vías.

Recursos: Sistemas de información geográfica con información de tráfico vehicular

Periodicidad: Mensual

Nivel de referencia: Área de influencia

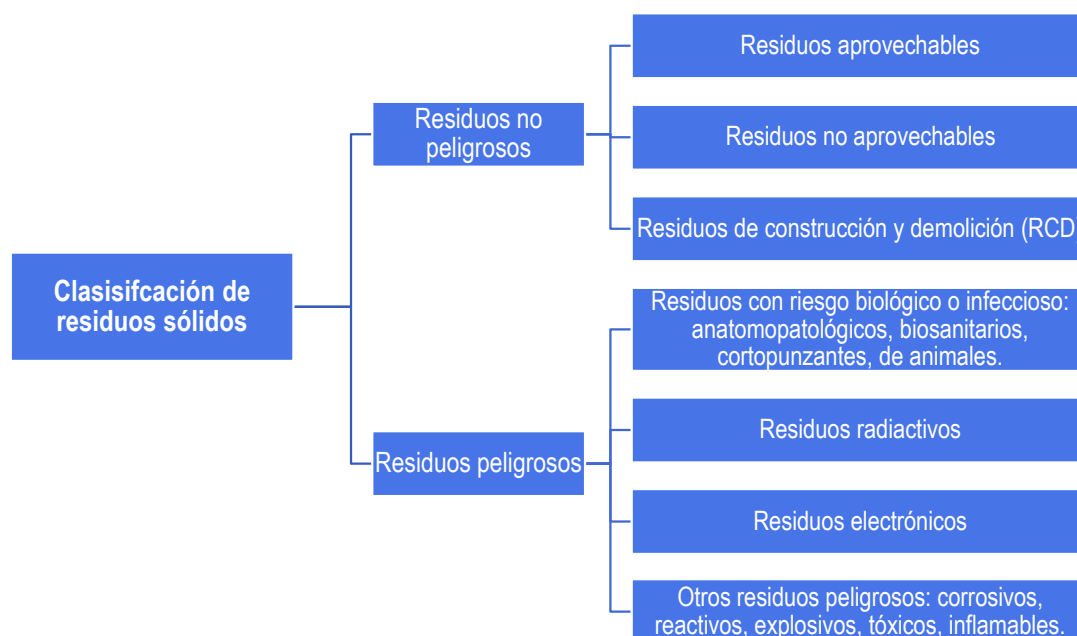
Puntos de lectura: Información de sistemas de información geográfica

130. Índice generación de residuos

Objetivo: Los residuos sólidos son los materiales restantes, luego del consumo de un bien o un servicio, que generalmente son rechazados por el generador y enviados a una disposición final. Estos pueden tener diferentes características por lo que algunos pueden ser (o no) peligrosos, y pueden causar riesgos y daños no deseados en la salud humana y el ambiente por sus características reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas y/o radiactivas, o, en general, pueden tener requerimientos de manejo particular (IDEAM, 2018). En la Figura 22 se muestra la clasificación de residuos sólidos.

El índice de generación de residuos expresa la cantidad de cada tipo de residuos (aprovechables, no aprovechables, biológicos-infecciosos, radiactivos, electrónicos y otros residuos peligrosos) generados en kilogramos por persona, unidad de producto (o servicio), y peso del producto.

Figura 22. Clasificación de residuos sólidos



Fuente: elaboración propia a partir de IDEAM (2018) y Minsalud & Minambiente (2015, 2020)

Definición:

$$RS_i = \sum_{j=1}^J \frac{B_{il}}{P_j}$$

$$RS_i = \sum_{j=1}^J \frac{B_{il}}{U_j}$$

$$RS_i = \sum_{j=1}^J \frac{B_{il}}{W_j}$$

Donde:

- RS_i : Residuos sólidos de tipo i (aprovechables, no aprovechables, biológicos-infecciosos, radiactivos, electrónicos y otros residuos peligrosos) generados por la actividad en el ciclo de vida del sistema.
- B_{il} : Cantidad de residuos sólidos del tipo i generados en el ciclo de vida del sistema
- P_j : Número de personas (empleados, contratistas, etc.) generadoras de residuos
- U_j : Número de unidades de producto elaborado
- W_j : Peso de producto elaborado (kg o T)

Con respecto a los residuos peligrosos, en la Tabla 91 se muestran los tipos de generadores.

Tabla 91. Clasificación de generadores de acuerdo con la cantidad de residuos peligrosos generados

Tipo de generador	Cantidad de residuos o desechos peligrosos generados (Kg/mes)
Gran generador	≥ 1000
Mediano generador	100 – 999
Pequeño generador	10 – 99
Microgenerador	< 10

Fuente: Minambiente & Minsalud (2015)

Dado que la acción que genera los residuos de construcción y demolición son las obras civiles, en este caso el índice se modifica teniendo en cuenta las particularidades de la actividad de construcción así:

$$RCD_T = \sum_{j=1}^n \frac{RCD_j}{A}$$

Donde:

RCD_T : Generación total de residuos de construcción y demolición (kg)
 RCD_j : Cantidad del residuo de demolición y construcción tipo j (kg)
 A : Área de la zona intervenida (m²)

Responsabilidad: Todas las actividades que generen residuos sólidos en sus procesos tanto operativos como administrativos o estratégicos. Las mediciones y registros sirven de base para la ejecución de estrategias de gestión y manejo según los requerimientos de cada tipo de residuo.

Recursos: Sistemas de medición de residuos y aforos, así como estadísticas de producción y personas involucradas en los procesos.

Periodicidad: Diligenciamiento diario en peso (kg) de los diferentes tipos de residuos generados (Minsalud & Minambiente, 2015), y sobre estos datos se realiza el cálculo mensual y anual.

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad

Puntos de lectura: Medición en el lugar de generación de residuos

131. Índice de intensidad de uso de materiales

Objetivo: La medición de la intensidad de uso de materiales permite hacer seguimiento a los niveles de consumo de materiales en los ciclos de vida de diferentes actividades, procesos o proyectos, con el fin identificar las presiones sobre los ecosistemas dependiendo del tipo de material, así como para medir la eficiencia del uso. A partir de esto, es posible generar iniciativas de mejoramiento de la eficiencia y rendimiento en el uso de materiales (Tecnalia & DNP, 2018). En la tabla Tabla 92 se definen las características de diferentes grupos de materiales.

Tabla 92. Tipos de materiales, características y ejemplos de usos

Material	Características	Usos
Biomateriales	Procedentes de la actividad de producción agroforestal.	Productos del sector agroalimentario, cosméticos, biomasa para la generación

Material	Características	Usos
		de energía, farmacéuticos, productos de construcción.
Materiales de construcción y cerámicos	Materiales extraídos de la tierra, destinados a procesos de manufactura y construcción como el cemento y el concreto.	Productos de construcción.
Polímeros	Los polímeros en general son materiales cuyo origen es el carbono y corresponde a largas cadenas de moléculas. Son comúnmente asociados con los productos plásticos.	Aparatos eléctricos y electrónicos, envases y empaques, productos de construcción, elementos de vehículos.
Metales	Materiales con buena capacidad conductora de la electricidad y el calor, con diferentes niveles de plasticidad que les permite ser usado en diferentes ámbitos.	Aparatos eléctricos y electrónicos, bienes de equipo, envases y empaques, productos de construcción, elementos para vehículos.
Celulósicos	Materiales provenientes de la celulosa de diferentes especies vegetales.	Envases y empaques de papel – cartón, libros, periódicos, revistas, material impreso.
Textiles	Los textiles tienen ciclos de vida largos, fragmentados y heterogéneos que comprenden la consecución de fibras naturales y sintéticas.	Prendas de vestir, cortinería, aplicaciones industriales.
Hidrocarburos	Sustancias utilizadas en la generación de energía de origen fósil.	Industrias, transporte, domésticos, entre otros.

Fuente: elaboración propia a partir de TecNALIA & DNP (2017, 2018)

Este índice expresa la cantidad de todos los materiales usados en el sistema de producción de bienes o servicios.

Definición:

$$IM_i = \sum_{l=1}^L ML_{l,i}$$

$$IM_{ij} = \sum_{l=1}^L \frac{ML_{l,i}}{P_j}$$

$$IM_{ij} = \sum_{l=1}^L \frac{ML_{l,i}}{U_j}$$

$$IM_{ij} = \sum_{l=1}^L \frac{ML_{l,i}}{W_j}$$

Donde:

IM_i : Intensidad en el uso de materiales tipo i en el ciclo de vida de la actividad

IM_{ij} : Intensidad del uso del material tipo i en el ciclo de vida del proceso, por número de personas y unidades o masa de producto. Mide la eficiencia del uso del material.
 ML_i : Cantidad de material tipo i usada en cada una de las etapas l del ciclo del vida del proceso
 P_j : Número de personas involucradas en el ciclo de vida de la actividad
 U_j : Número de unidades de producto elaborado
 W_j : Masa de producto elaborado (kg o T)

Responsabilidad: Todas las actividades.

Recursos: Sistemas de inventarios y sistemas de implementación de balance de masa por materiales.

Periodicidad: Mensual y/o anual.

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad.

Puntos de lectura: Mediciones por etapas del ciclo de vida de la actividad.

132. Índice intensidad de uso de la energía

Objetivo: La medición de la intensidad del uso de la energía evalúa el consumo de energía en las diferentes fases del ciclo de vida de un producto o servicio, en este sentido mide tanto impacto o presiones del consumo energético como la eficiencia del uso de la energía (DANE, 2017). El índice de intensidad de uso de la energía es una relación entre el nivel de consumo energético en relación con el producto o resultado de la actividad.

Definición:

$$IE_i = \sum_{l=1}^L ENL_{l,i}$$

$$IE_{ij} = \sum_{l=1}^L \frac{ENL_{l,i}}{P_j}$$

$$IE_{ij} = \sum_{l=1}^L \frac{ENL_{l,i}}{U_j}$$

$$IE_{ij} = \sum_{l=1}^L \frac{ENL_{l,i}}{W_j}$$

Donde:

IE_i : Intensidad en el uso de la energía de fuentes tipo i en el ciclo de vida de la actividad

IE_{ij} : Intensidad en el uso de la energía de fuentes tipo i durante el ciclo de vida del proceso por las personas, unidades o masas de producción de la actividad (j). Mide la eficiencia del uso de la energía.

$ENL_{i,j}$: Cantidad de energía de la fuente i usada en la etapa i del ciclo de vida del proceso expresada en MJ

P_j : Número de personas involucradas en el ciclo de vida de la actividad

U_j : Número de unidades de producto elaborado

W_j : Peso de producto elaborado (kg o T)

Responsabilidad: Todas las actividades

Recursos: Sistemas de medición e inventario energéticos

Periodicidad: Mensual

Nivel de referencia: Lugar de realización de la actividad

Puntos de lectura: Mediciones por etapas de proceso

Componente económico

133. Índice de precios al consumidor (IPC)

Objetivo: Este permite identificar y hacer seguimiento a la variación de los precios de la canasta de consumo de bienes y servicios en los hogares (DANE, 2012c). Por supuesto, este índice es respuesta de las dinámicas del contexto en donde está el mercado del hogar y de los procesos o actividades que provocan modificaciones de las dinámicas sociales locales, que pueden provocar cambios en los precios (FMI, 2006).

Definición:

$$IPC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} \left(\frac{P_{ijt}}{P_{ij0}} \right)$$

$$\sum_{i=1}^n w_{ij} = 1$$

Donde:

IPC : Índice de precios al consumidor.

w_{ij} : Ponderación del grupo de la canasta familiar tipo i . Estos ponderadores asociados a grupos de productos han sido definidos por el DANE y clasificados por grupo poblacional según la condición económica de cada uno (Tabla 93).

P_{ijt} : Precio del producto tipo j del grupo de la canasta familiar tipo i en el tiempo t de análisis.

P_{ij0} : Precio del producto tipo j del grupo de la canasta familiar tipo i en el tiempo 0 (base de comparación).

i : Tipos de productos de la canasta familiar definidos por el Estado.

Tabla 93. Ponderadores para el índice de precios al consumidor según por grupo poblacional según condición económica.

Nombre	Pobres (%)	Vulnerables (%)	Clase Media (%)	Ingresos Altos (%)	Total (%)
Alimentos y bebidas no alcohólicas	23,78	22,24	15,80	8,16	15,05
Bebidas alcohólicas y tabaco	1,82	1,88	1,72	1,53	1,70
Prendas de vestir y calzado	3,30	3,50	3,91	4,49	3,98
Alojamiento, agua, electricidad, gas y otros combustibles	40,17	36,33	33,13	30,44	33,12
Muebles, artículos para el hogar y para la conservación ordinaria del hogar	2,97	3,07	3,75	5,99	4,19
Salud	1,51	1,40	1,52	2,34	1,71
Transporte	7,08	10,07	13,00	15,12	12,93
Información y comunicación	2,66	3,25	4,58	4,56	4,33
Recreación y cultura	2,61	2,89	3,46	5,19	3,79
Educación	1,64	1,74	4,29	6,55	4,41
Restaurantes y hoteles	7,23	8,17	9,48	10,31	9,43
Bienes y servicios diversos	5,23	5,46	5,35	5,32	5,36
Total	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: DANE (2019)

Responsabilidad: Actividades que puedan generar fenómenos sociales que incidan en el aumento o disminución de los precios de la canasta familiar, a nivel local.

Recursos: Encuestas y análisis estadísticos.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Unidades territoriales definidas como área de influencia del medio socio-económico.

134. Tasa de desempleo (TD)

Objetivo: Establecer una relación porcentual entre el número de personas en condición de desocupación o que siendo fuerza laboral activa no tienen empleo y están buscándolo, y la población económicamente activa o que integra la fuerza laboral (DANE, 2012b).

Definición:

$$TD = \frac{PDT}{PEA}$$

Donde:

TD: Tasa de desempleo.

PDT: Población en condición de desocupación pero que cuenta con disponibilidad para trabajar.

PEA: Población económicamente activa.

Responsabilidad: Actividades que tengan gran incidencia en la generación o pérdida de empleos locales tanto directa como indirectamente. Las autoridades locales deben, a su vez, registrar los cambios en las tasas de empleo y definir aquellos causados únicamente por la actividad que ante su eventual retiro pueda afectar los niveles locales de ocupación laboral.

Recursos: Información oficial del DANE.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Unidad territorial.

Puntos de lectura: Unidades territoriales definidas como área de influencia del medio socio-económico.

135. Tasa global de participación (TGP)

Objetivo: Este indicador mide las presiones sobre el mercado laboral relacionando a la población económicamente activa (PEA) con la población en edad de trabajar (PET) (DANE, 2012d). La población económicamente activa es aquella que estando en edad de laborar se encuentra en los sistemas de empleo, trabajan de manera independiente o están en proceso de búsqueda. En la Tabla 94 se presentan las posibles categorías de personas dentro de la PEA. Por su parte, la población en edad de trabajar inicia a la edad de 12 años en las zonas urbanas y 10 años en las zonas rurales. La diferencia entre PET y PEA corresponde a la población económicamente inactiva, constituida por estudiantes, amas de casa, pensionados, rentistas, inválidos o quienes no buscan trabajar (DANE, 2012d).

Tabla 94. Categorías de personas de la PEA

Categoría de PEA	Descripción
Ocupados (O)	Personas que en el periodo de análisis trabajaron por lo menos una hora semanal (remunerada o no), o que no trabajaron pero que contaban con empleo.
Ocupados informales (OI)	Trabajadores de empresas con cinco o menos personas (incluyendo a patrones y socios) que sean: familiares, trabajadores sin remuneración, empleados domésticos, jornaleros o peones, o trabajadores por cuenta propia. Dentro de la categoría se excluyen independientes profesionales y empleados del gobierno.
Desocupados (D)	Personas que en el periodo de análisis se encontraban en condición de desempleo abierto (sin empleo, disponible y realizando diligencias de búsqueda), desempleo oculto (sin empleo, disponible, pero sin hacer diligencias de búsquedas)

Fuente: DANE (2012)

Definición:

$$TGP_t = \frac{PEA_t}{PET_t}$$

$$PEA_t = O_t + OI_t + D_t$$

Donde:

TGP_t : Tasa global de participación en el periodo de análisis t

PEA_t : Población económicamente en el periodo de análisis t

PET_t : Población en edad de trabajar en el periodo de análisis t

O_t : Población ocupada en el periodo de análisis t

OI_t : Población ocupada de manera independiente en el periodo de análisis t

D_t : Población desocupada en el periodo de análisis t

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en la modificación de la población económicamente activa y la merma o aumento de presiones en el mercado laboral.

Recursos: Información demográfica y estadísticas

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Municipios del área de influencia

Puntos de lectura: Información oficial

136. Tasa de ocupación de la población económicamente activa

Objetivo: Este índice relaciona a la población ocupada con el total de la población en edad de trabajar (DANE, 2012d).

Definición:

$$TO_t = \frac{OC_t}{PET_t}$$

Donde:

TO_t : Tasa de ocupación en el periodo de análisis t

OC_t : Población ocupada en el periodo de análisis t

PEA_t : Población en edad de trabajar en el periodo de análisis t

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en la modificación de la ocupación de la población económicamente activa.

Recursos: Información demográfica y estadísticas

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Municipios del área de influencia

Puntos de lectura: Información oficial

137. Índice de valorización predial (IVP)

Objetivo: Este índice hace una estimación de la variación porcentual promedio de los precios de los predios, destinados a la vivienda en zonas urbanas. Las variaciones reflejan la dinámica de los precios del mercado y

también el impacto de estos procesos en las finanzas municipales, considerando que el impuesto predial, cuya base de valoración es el avalúo catastral, es parte importante de sus ingresos tributarios (DANE, 2009, 2012c).

Definición:

$$IVP_C = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} IR_i}{n_c}$$

$$IR_{i,t} = \frac{A_{t,i}}{A_{t-1,i}}$$

Donde:

IVP_C : Índice de valorización predial por ciudad o municipio

IR_i : Índice relativo del cambio del valor del avalúo catastral para el predio i

$IR_{i,t}$: Índice relativo del cambio del valor del avalúo del predio i evaluado en dos periodos consecutivos t y t-1.

$A_{t,i}$: Avalúo del año t (actual) del predio i

$A_{t-1,i}$: Avalúo del año t-q (anterior) del predio i

n_c : Número de predios por ciudad o municipio

En la Tabla 95 se muestra la interpretación de este índice $IR_{i,t}$

Tabla 95. Interpretación del índice relativo del cambio del valor del avalúo catastral

Valor del índice $IR_{i,t}$	Descripción
>1	Incremento del valor del predio entre el año base de comparación t-1 y el año t.
1	El precio del predio no registra ningún cambio entre el año base de comparación t-1 y el año t.
<1	Caída del valor del predio entre el año base de comparación t-1 y el año t.

Fuente: elaboración propia a partir de DANE (2009)

De manera análoga al índice relativo del cambio de valor del avalúo catastral, en la Tabla 96, se presenta la interpretación del IVP_C como resultado del agregado de la valorización individual de cada predio para vivienda.

Tabla 96. Interpretación del índice relativo del cambio del valor del avalúo catastral

Valor del índice IVP_C	Descripción
>1	Incremento del valor de los predios de un municipio en el periodo t
1	El precio agregado de los predios de un municipio no presentan cambios en el periodo t
<1	Caída del valor de los predios de un municipio en el periodo t

Fuente: elaboración propia a partir de DANE (2009)

Responsabilidad: Esté índice debe ser registrado y monitoreado por parte de las actividades que impliquen un uso del suelo que pueda afectar positiva o negativamente la dinámica del mercado local de compra de vivienda, y, por lo tanto, los precios. Asimismo, las autoridades locales deben hacer seguimiento a las variaciones de los precios que puedan ser causados por especulación (como en el caso de disminución de la oferta por concentración de la propiedad) o cuando una actividad genere condiciones de deterioro en su contexto, de manera que los precios de la vivienda se vean afectados.

Recursos: Información oficial del DANE, información primaria.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Área de influencia de las actividades.

Puntos de lectura: Unidades territoriales definidas como área de influencia del medio socio-económico.

138. Índice Gini de la Tierra Rural (GTR)

Objetivo: El *índice Gini de la tierra rural* estima el nivel de concentración de la propiedad de la tierra en una unidad espacial específica en un periodo de tiempo establecido, teniendo en cuenta tanto la cantidad de tierra como las personas que ejercen el derecho legal de propiedad (Offstein & Hillón, 2003; Sinchi, 2009).

Definición:

$$GTR_{jt} = 1 - \sum_{i=1}^n \left((PH_{i-1jt} + PH_{ijt}) \times (PA_{ijt} - PA_{i-1jt}) \right)$$

$$PH_{ijt} = \sum_{k=1}^n \frac{AR_{ijtk}}{AT_{jt}}$$

$$PA_{ijt} = \frac{PR_{ijt}}{PT_{jt}}$$

Donde:

GTR_{jt} : Índice de Gini de la tierra rural con respecto al número de propietarios en una unidad espacial de referencia j, en el tiempo de análisis t (Sinchi, 2009).

PH_{ijt} : Participación acumulada de la superficie de los predios rurales agrupados en rangos de tamaño tipo i, en una unidad espacial de referencia j, en un tiempo t (Sinchi, 2009).

AR_{ijtk} : Superficie en hectáreas de los predios rurales de cada rangos tipo i (donde k es cada uno de los predios del rango y n el número de predios), que están en la unidad espacial de referencia j, en un tiempo t (Sinchi, 2009).

AT_{jt} : Superficie total de los predios que se encuentra en la unidad espacial de referencia j en el tiempo t (Sinchi, 2009).

PA_{ijt} : Participación del número de propietarios de los predios rurales agrupados por cada rango tipo i registrados en el IGAC, de la unidad espacial de referencia j, en el tiempo t (Sinchi, 2009).

PR_{ijt} : Número de propietarios de los predios rurales de los predios en los tipos de rango i, en la unidad espacial de referencia j, en el tiempo t (Sinchi, 2009).

PT_{jt} : Número de propietarios de predios rurales con títulos registrados en el IGAC, en la totalidad de la unidad espacial de referencia j , en el tiempo t (Sinchi, 2009).

El Índice Gini de la Tierra Rural varía entre uno y cero, y asume valores cercanos a 0 cuando la concentración de la tierra es inexistente o reducida y representa una distribución de la propiedad equilibrada. En contraste, cuando el valor se acerca a 1, la tierra rural está muy alta o totalmente concentrada (Offstein & Hillón, 2003; Sinchi, 2009).

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir potencialmente en los procesos de apropiación de la tierra (tanto directamente como indirectamente).

Recursos: Información catastral del área de influencia.

Periodicidad: Se debe hacer una medición inicial como referente previo al inicio de la actividad con potencial influencia en los procesos de acumulación de la tierra. Luego, deben hacerse actualizaciones anuales.

Nivel de referencia: Municipios asociados al área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Información catastral y análisis espacial en SIG.

139. Índice de pobreza multidimensional

Objetivo: Es un índice integrado de pobreza cuyo propósito es identificar sus niveles a partir del análisis de diferentes dimensiones al interior de los hogares que pueden generar estados de pobreza. Para Colombia se proponen las siguiente: condiciones educativas del hogar, condiciones de la niñez y la juventud, salud, trabajo, acceso a los servicios públicos domiciliarios y las condiciones de vivienda (Angulo Salazar et al., 2011; CEPAL, 2017).

El enfoque de hogar permite asociar diferentes condiciones de pobreza a grupos de personas y no a individuos. En este sentido, las afectaciones de cualquiera de las condiciones a alguno o alguna integrante del hogar lo afecta como conjunto (Angulo Salazar et al., 2011).

Definición:

$$IPM = \sum_{i=1}^{15} PV \times VIP_i$$

Donde:

IPM : Índice de pobreza multidimensional

VIP_i : Variables indicadores de pobreza. En total hay quince variables para las cinco dimensiones. La variable asume en valor de uno (1) cuando se cumple algún criterio de privación (Tabla 97).

PV : Ponderación de las variables cuyo valor corresponde a la división del peso de la dimensión que es 20% para cada una, entre el número de variables que contiene (Tabla 97).

Tabla 97. Dimensiones, variables y criterios de privación del Índice de Pobreza Multidimensional

Dimensión	Variable	Criterio de privación
Condiciones educativas del hogar (20%)	Bajo logro educativo (10%)	Cuando el promedio de logro educativo de personas de quince años y más es menor a 9 años escolares. Cuando en el hogar no hay personas de quince años o más.

Dimensión	Variable	Criterio de privación																								
	Analfabetismo (10%)	Cuando al menos una persona del hogar entre quince y más años no sabe leer y escribir. Cuando en el hogar no hay personas de quince años o más.																								
Condiciones de la niñez y la juventud (20%)	Inasistencia escolar (5%)	Al menos una persona en edad escolar (de 6 a 16 años) no asiste al colegio.																								
	Rezago escolar (5%)	Cuando por lo menos una de las personas en edad escolar entre los 7 y 17 años tienen rezago con base en la siguiente relación: <table><tr><th>Edad</th><th>Número de años normativos aprobados</th></tr><tr><td>7</td><td>1</td></tr><tr><td>8</td><td>2</td></tr><tr><td>9</td><td>3</td></tr><tr><td>10</td><td>4</td></tr><tr><td>11</td><td>5</td></tr><tr><td>12</td><td>6</td></tr><tr><td>13</td><td>7</td></tr><tr><td>14</td><td>8</td></tr><tr><td>15</td><td>9</td></tr><tr><td>16</td><td>10</td></tr><tr><td>17</td><td>11</td></tr></table>	Edad	Número de años normativos aprobados	7	1	8	2	9	3	10	4	11	5	12	6	13	7	14	8	15	9	16	10	17	11
	Edad	Número de años normativos aprobados																								
	7	1																								
	8	2																								
9	3																									
10	4																									
11	5																									
12	6																									
13	7																									
14	8																									
15	9																									
16	10																									
17	11																									
Barreras de acceso a servicios para el cuidado de la primera infancia (5%)	Al menos un niño o niña entre 0 y 5 años de un hogar no se encuentra estudiando, no tiene seguridad social en salud y no recibe almuerzo o algún refrigerio en el plantel educativo al que asiste. Si no hay niños en estas edades no se considera privación.																									
Trabajo infantil (5%)	Al menos un niño o niña del hogar entre 5 y 17 años está dentro del mercado laboral. Si no hay personas de estas edades no se considera como limitación.																									
Trabajo (20%)	Desempleo de larga duración (10%)	Porcentaje de la población económicamente activa del hogar que está desempleada por más de doce meses. Se calcula como: $\%DLD = \left(1 - \frac{DLD}{PEA}\right) \times 100$ Donde: %DLD: porcentaje de población con desempleo de larga duración (superior a 12 meses) en el hogar DLD: número de personas con desempleo de larga duración en el hogar PEA: personas económicamente activa en el hogar Un hogar en el que por lo menos una persona económicamente activa se encuentre en desempleo de larga duración o en donde no hay PEA, tiene condición de privación en esta variable (no aplica a pensionados).																								
	Empleo informal (10%)	Se considera condición de privación cuando menos del 100% de las PEA del hogar tiene ocupación con afiliación al sistema de pensiones. Se calcula como: $\%OAI = \left(\frac{OAI}{PEA}\right) \times 100$ Donde: %OAP: Porcentaje de población del hogar con ocupación y afiliación al sistema de pensiones. OAP: número de personas ocupadas con afiliación a pensiones PEA: personas económicamente activa en el hogar.																								

Dimensión	Variable	Criterio de privación
		Del indicador se excluyen desempleados de larga duración y trabajadores menores de 18 años, asimismo, se considera privación cuando en el hogar no hay PEA.
Salud (20%)	Sin aseguramiento en salud (10%)	Cuando alguno de los miembros del hogar no se encuentra asegurado en un sistemas de salud. El indicador se mide solo para personas mayores de cinco años, para no realizar doble medición.
	Barreras de acceso a servicios de salud dada una necesidad (10%)	Sólo en los casos en que se presenten problemas de salud asociados a enfermedad, accidente, problema odontológico u otros que no impliquen hospitalización. Hay privación cuando menos del 100% de las personas del hogar tiene barreras de acceso a sistemas de salud en cualquiera de las condiciones médicas mencionadas (si no se presentan, tampoco hay privación).
Acceso a servicios públicos domiciliarios y condiciones de la vivienda (20%)	Acceso a fuente de agua mejorada (4%)	En el área urbana, la privación se da cuando la vivienda no cuenta con conexión a servicio público de acueducto. En el sector rural, cuando teniendo o no servicio de acueducto, los alimentos son preparados con agua de pozos sin bomba, agua lluvia, manantiales, pilas públicas, carrotanque, u otras fuentes que no garanticen la calidad para el consumo.
	Eliminación de excretas (4%)	Se encuentran en privación las viviendas urbanas sin servicio de alcantarillado y las viviendas rurales que tienen inodoro sin conexión, letrina o ningún servicio sanitario.
	Calidad de los pisos (4%)	La privación se da en hogares con pisos en tierra
	Calidad de paredes exteriores (4%)	La privación se da cuando las paredes son de madera burda, tabla, tablón, guadua u otro vegetal, zinc, tela, cartón, desechos o no hay paredes.
	Hacinamiento crítico (4%)	Cuando en habitaciones diferentes a la cocina, baño y garaje, habitan 3 o más personas.

Fuente: Angulo Salazar et al. (2011).

Se considera que hay condiciones de pobreza multidimensional si la suma ponderada es por lo menos de 5 sobre 15 (CEPAL, 2017).

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en las condiciones económicas de la región en donde se realizan.

Recursos: Estadísticas oficiales o investigación social en campo.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Municipios del área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Información oficial e información primaria en campo.

140. Cambio en el PIB municipal

Objetivo: El Producto Interno Bruto (PIB) mide el desempeño económico de un área geográfica establecida y resulta de la consolidación del valor de mercado de los bienes y servicios finales producidos en ese territorio, el valor agregado y los ingresos distribuidos por las unidades de producción de los residentes, durante un periodo definido (DANE, 2012c). Las actividades que se desarrollan en el ámbito de un territorio pueden

modificar los patrones de crecimiento económico medidos desde el PIB tanto incrementándolo como disminuyéndolo, por lo tanto, es necesario verificar los cambios de esta medida para reconocer su influencia.

Definición:

$$\Delta PIB_M = \frac{PIB_{Mt} - PIB_{Mt-1}}{PIB_{Mt-1}}$$

Donde:

ΔPIB_M : Variación del Producto Interno Bruto municipal

PIB_{Mt} : Producto Interno Bruto municipal del periodo actual

PIB_{Mt-1} : Producto Interno Bruto municipal del periodo anterior

Responsabilidad: Actividades con potencial para modificar las condiciones económicas locales que redunden en un incremento o disminución de su crecimiento medido en términos del PIB.

Recursos: Información oficial del municipio

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Municipios del área de influencia

Puntos de lectura: Información secundaria de los municipios del área de influencia.

141. Aporte al PIB municipal

Objetivo: Estimar o definir los cambios en el PIB de los municipios ubicados en el área de influencia del POA, derivados de su ejecución con el propósito de medir su impacto en el componente económico.

Definición:

$$A_{PIBm} = \frac{IN_{POAt}}{PIB_{Mt}}$$

Donde:

A_{PIBm} : Aporte del POA al Producto Interno Bruto municipal

IN_{POAt} : Ingresos municipales netos generados por el POA para el municipio en el periodo t

PIB_{Mt} : Producto Interno Bruto municipal del periodo t

Responsabilidad: Actividades con potencial para modificar las condiciones económicas locales que redunden en un incremento o disminución del PIB de un municipio.

Recursos: Información oficial del municipio

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Municipios del área de influencia

Puntos de lectura: Información secundaria de los municipios del área de influencia.

142. Captura por unidad de esfuerzo (especies y métodos de captura)

Objetivo: Definir la cantidad en masa de recuperación en pesca en un día de trabajo en una zona dedicada a la pesca. Se mide en kg/día según la especie y método de captura. Es un indicador de las presiones sobre la pesca y puede dar indicios del estado de las especies más vulnerables debido a la sobreexplotación o a la afectación de la calidad del agua. La definición del índice parte de la descripción realizada por González Pareja (2012), incluyendo métodos de captura y especies.

Definición:

$$CUE_{(m-e)} = \sum_{i=1}^n \frac{MP_{i(m-e)}}{d}$$

Donde:

$CUE_{(m-e)}$: Captura por unidad de esfuerzo por método de captura por especie, como resultado de la agregación de las unidades de pesca tipo i.

$MP_{i(m-e)}$: Masa de pesca capturada por método por especie por unidades de pesca tipo i. Las unidades de pesca pueden ser tanto los pescadores individuales en el caso de la pesca artesanal hasta las embarcaciones de pesca industrial, asociados al método de captura.

d : Día de pesca o unidad de esfuerzo

Responsabilidad: Proyecto, obras y actividades que tengan el potencial de afectar los niveles de pesca.

Recursos: Bases de datos y estadísticas de pesca.

Periodicidad: Mensual con un muestreo de duración diaria

Nivel de referencia: Área de influencia de la actividad

Puntos de lectura: Zonas de pesca

Componente cultural

143. Asistencia escolar

Objetivo: La asistencia escolar indica la relación entre la cantidad de personas establecidas en un rango de edad que asisten a una institución educativa (preescolar, escuela, colegio o universidad) con la población total del rango de edad específico que podría asistir a un nivel de escolaridad (DANE, 2012b).

Definición:

$$AE_{t,n} = \frac{PEI_{t,n}}{PE_{t,n}} \times 100$$

Donde:

$TBC_{t,n}$: Tasa de cobertura bruta para el periodo t del nivel educativo n.

$PEI_{t,n}$: Número de personas inscritas en el periodo t del nivel educativo n.

$PE_{t,n}$: Número de personas totales con edad escolar para el periodo n en el periodo t.

El Ministerio de Educación Nacional (Mineducación) ha definido los rangos de edad y su correspondiente nivel de escolaridad de acuerdo con la Tabla 98 (DANE, 2012b).

Tabla 98. Rangos de edad y nivel de escolaridad asociado por parte del Ministerio de Educación Nacional (MEN).

Nivel de escolaridad	Rango de edad
Preescolar	3 a 5 años
Básica primaria	6 a 10 años
Básica secundaria	11 a 14 años
Educación media	15 a 16 años
Educación superior	17 a 24 años

Fuente: DANE (2012b).

Responsabilidad: Actividades que tengan incidencia en las dinámicas sociales y/o la infraestructura educativa.

Recursos: Información oficial de número de personas inscritas en los niveles educativos y sus edades y la población total asociada a cada nivel escolaridad en el rango de edad.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Región o área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Información oficial.

144. Tasa de cobertura escolar bruta

Objetivo: Indicador de la capacidad del sistema educativo para cubrir la demanda, medido como la relación entre el número de cupos disponibles y el número de personas totales en edad escolar (DANE, 2012b).

Definición:

$$TBC_{t,n} = \frac{M_{t,n}}{PE_{t,n}} \times 100$$

Donde:

$TBC_{t,n}$: Tasa de cobertura bruta para el periodo t del nivel educativo n.

$M_{t,n}$: Número de plazas o cupos disponibles en el periodo t del nivel educativo n.

$PE_{t,n}$: Número de personas totales con edad escolar para el periodo n en el periodo t.

Responsabilidad: Actividades que tengan incidencia en la infraestructura educativa o que causen el movimiento masivo de población.

Recursos: Información oficial de cupos disponibles en los diferentes niveles educativos y la población en edad escolar asociada.

Periodicidad: Anual.

Nivel de referencia: Región o área de influencia de la actividad.

Puntos de lectura: Información oficial.

145. Densidad de infraestructura cultural

Objetivo: este indicador relaciona el número de establecimientos de tipo cultural con la población de una región, poblado, municipio, entre otros. Se mide tanto de manera diferenciada por tipo de establecimiento cultural como de forma agregada, de manera que en primer lugar sea posible identificar ausencias, apariciones o cambios en un tipo específico de infraestructura y de esta manera reconocer la diversidad de la oferta cultural. En segundo lugar, se busca definir la densidad total de la oferta cultural. Las diferentes categorías de infraestructuras culturales son: (1) espacios de exhibición dedicados a las artes; (2) museos; y, (3) bibliotecas públicas o mediatecas (Ministerio de Cultura de Perú, 2015).

Definición:

$$DIC_j = \frac{IC_j}{P_r}$$

$$DIC_T = \sum_{j=1}^m DIC_j$$

Donde:

DIC_j : Densidad de espacios culturales por tipo de categoría de infraestructura cultural j (espacios de exhibición dedicados a las artes, museos, bibliotecas públicas o mediatecas) en relación con la población de la zona o región de análisis.

DIC_T : Densidad de espacios culturales totales en relación con la población de la zona o región de análisis.

IC_j : Número de espacios culturales de la categoría j

P_r : Población total de la región a analizar

j : Categorías de infraestructura cultural

Responsabilidad: Actividades que tengan incidencia en las dinámicas sociales locales o que por su presencia puedan contribuir o deteriorar las condiciones culturales locales.

Recursos: Información oficial de población y establecimientos culturales, y, de ser necesario, Sistemas de Información Geográfica.

Periodicidad: Anual

Nivel de referencia: Área o región de influencia de la actividad

Puntos de lectura: Información oficial y SIG

146. Índice de calidad del paisaje

Objetivo: El paisaje constituye una expresión espacial y visual del medio que consolida la organización de los territorios y tiene funciones ecosistémicas y de percepción asociada a su estética visual. En sí es un concepto complejo y multidimensional que es el resultado de interrelaciones de fenómenos geomorfológicos, climáticos,

hídricos, así como las características de la flora y la fauna y las modificaciones antrópicas (Muñoz-Pedrerros, 2004).

Teniendo en cuenta su carácter multidimensional, no basta con la evaluación de aspectos físicos asociados a las características de los paisajes, sino que se debe incorporar aspectos cualitativos de la percepción estética que estos espacios generan (Muñoz-Pedrerros, 2004).

Definición: Para evaluar este indicador deben hacerse entrevistas a público general y diverso que se relacione estéticamente con el paisaje. Este proceso se puede realizar a través de fotografías (de máximo 3 km de distancia con respecto al paisaje a analizar) y las respuestas a la percepción de ese paisaje se clasifican de acuerdo con la Tabla 99. En este caso, las valoraciones bajas corresponden a experiencias visuales negativas y las altas (hasta 32) a buenas respuestas ante la calidad visual del paisaje. Por otra parte, para evaluar la fragilidad de espacios físicos del paisaje, se convoca a un grupo de expertos y se analizan las variables de acuerdo con la Tabla 100 (Muñoz-Pedrerros, 2004).

Tabla 99. Lista de adjetivos jerárquicos y correlación con valor numérico

Adjetivos		Valor numérico	Categorías	Valor numérico
1.	Insoportable	0.00	Feo	0 -1
2.	Horrible	0.25		
3.	Desagradable	0.50		
4.	Pésimo	0.75		
5.	Feo	1.00		
6.	Triste	1.10	Sin interés	1.1-2
7.	Pobre	1.25		
8.	Frío	1.50		
9.	Monótono	1.75		
10.	Sin interés	2.00		
11.	Común	2.10	Agradable	2.1-4
12.	Sencillo	2.50		
13.	Pasable	3.00		
14.	Regular	3.50		
15.	Aceptable	4.00		
16.	Interesante	4.10	Distinguido	4.1-8
17.	Grato	5.00		
18.	Conservado	7.00		
19.	Singular	8.00		
20.	Variado	8.10	Fantástico	8.1-16
21.	Estimulante	10.00		
22.	Bonito	12.00		
23.	Hermoso	14.00		
24.	Precioso	16.00		
25.	Estupendo	16.10	Espectacular	16.1 -32
26.	Soberbio	20.00		
27.	Maravilloso	24.00		
28.	Fantástico	28.00		

	Adjetivos	Valor numérico	Categorías	Valor numérico
29.	Espectacular	32.00		

Fuente: Muñoz-Pedrerros (2004)

Tabla 100. Factores para evaluar la fragilidad de un paisaje

Factor	Característica	Valores de fragilidad	
		Nominal	Número
D Densidad de la vegetación	67 -100% suelo cubierto por especies leñosas	Bajo	1
	34 -67% suelo cubierto por especies leñosas	Medio	2
	0 -34% suelo cubierto por especies leñosas	Alto	3
E Diversidad de estratos de la vegetación	> 3 estratos vegetacionales	Bajo	1
	2 - 3 estratos vegetacionales	Medio	2
	1 estrato vegetacional dominante	Alto	3
A Altura de la vegetación	> 3 m de altura promedio	Bajo	1
	1m - 3 m de altura promedio	Medio	2
	< 1 m de altura promedio	Alto	3
ES Estacionalidad de la vegetación	Vegetación dominante perennifolia	Bajo	1
	Vegetación Mixta	Medio	2
	Vegetación dominante caducifolia	Alto	3
CV Contraste cromático vegetación/vegetación	Manchas policromáticas sin pauta nítida	Bajo	1
	Manchas policromáticas con pauta nítida	Medio	2
	Manchas monocromáticas	Alto	3
CS Contraste cromático vegetación/suelo	Contraste visual bajo	Bajo	1
	Contraste visual medio	Medio	2
	Contraste visual alto	Alto	3
P Pendiente	0-25%	Bajo	1
	25 -55%	Medio	2
	>55%	Alto	3
O Orientación del paisaje	Exposición sur/este	Bajo	1
	Exposición sureste/noreste	Medio	2
	Exposición norte/oeste	Alto	3
H Valor histórico y cultural	Baja unicidad, singularidad y/o valor	Bajo	1
	Media unicidad, singularidad y/o valor	Medio	2
	Alta unicidad, singularidad y/o valor	Alto	3

Fuente: Muñoz-Pedrerros (2004)

A partir de la evaluación de los atributos de fragilidad, se aplica la siguiente ecuación para determinar el nivel en el que se encuentra el paisaje evaluado:

$$VFVP = \frac{\sum f}{n}$$

Donde:

VFVP: Valor de fragilidad visual del paisaje
 f : Factores de evaluación de la fragilidad
 n : Número de factores evaluados

Luego de la evaluación de los diferentes, los atributos de calidad y fragilidad de los paisajes se evalúan de acuerdo con la Tabla 101.

Tabla 101. Evaluación de la calidad y la fragilidad visual de los paisajes

Rango de calidad	Nivel de calidad	Rango de fragilidad	Nivel de fragilidad
≥ 8.1	Alta	≥ 2.5	Alta
2.1 – 8.0	Media	1.5 – 2.4	Media
0 – 2.0	Baja	≤ 1.4	Baja

Fuente: Muñoz-Pedrerros (2004)

La combinación de nivel de calidad y de fragilidad permite identificar las capacidades de uso de los paisajes de acuerdo con sus características (Tabla 102).

Tabla 102. Capacidad de uso de un paisaje de acuerdo con sus características de calidad y fragilidad

Clase	Características		Uso
	Calidad	Fragilidad	
1	Alta	Alta	Conservación
2	Alta	Media	Turismo / recreación de bajo impacto
3	Alta	Baja	Turismo /recreación
4	Media	Alta/Media	Puede ser de clase 1 o 2, definido a través de estudios profundos
5	Baja	Alta/Media	Puede ser de clase 6, definido a través de estudios profundos
6	Baja	Baja	Actividades de alto impacto visual, con medidas de mejoramiento del paisaje

Fuente: Muñoz-Pedrerros (2004)

Responsabilidad: Actividades que puedan incidir en las características de calidad visual y fragilidad de los paisajes por remoción o cambio de las coberturas, introducción de nuevos elementos, entre otros factores.

Recursos: Grupo de investigadores sociales, sistemas de información espacial, fotografías a máximo 3 km de los paisajes a evaluar.

Periodicidad: La evaluación debe realizarse antes de que se introduzca cualquier actividad como valor de referencia. El monitoreo debe realizarse anualmente desde la introducción de la actividad.

Nivel de referencia: Área de influencia

Puntos de lectura: Entrevista a diferentes porciones de la población afectada por la calidad visual del paisaje y a grupos de expertos sobre las características del paisaje.

Componente político administrativo

147. Índice de Vulnerabilidad territorial (IVT)

Objetivo: Este índice busca mostrar las condiciones de vulnerabilidad de un territorio frente a situaciones de conflicto a través de la identificación y evaluación de variables de carácter social que indiquen el estado de las líneas estratégicas de atención humanitaria, seguridad, justicia, desarrollo social y económico, y gobernabilidad. Se entiende, por lo tanto, que si un territorio cuenta con condiciones sociales que garanticen derechos fundamentales, la posibilidad de realizar diversas actividades económicas, sociales y culturales, habría un menor grado de predisposición a entrar en procesos de conflicto armado y sería, además, más evidente la presencia del Estado (DPN, 2015). En la Tabla 103 se muestran cada una de las líneas estratégicas y sus indicadores asociados.

Tabla 103. Componentes y variables del Índice de Vulnerabilidad Territorial (IVT)

Línea estratégica	N	Variable	Indicador	Fuente de información
Atención humanitaria	1	Tasa de desplazamiento-expulsión	Tasa por 100.000 habitantes	UARIV
Seguridad	2	Tasa de homicidio	Tasa por 100.000 habitantes	SIEDCO
	3	Tasa de secuestro	Tasa por 100.000 habitantes	SIEDCO
	4	Hectáreas de coca	Hectáreas de cultivo	SIMCI – UNODC
	5	Tasa de Hurto	Tasa por 100.000 habitantes	SIEDCO
Justicia	6	Presencia de la fiscalía	De acuerdo con el componente seguridad y la presencia o no de la fiscalía, se asigna un puntaje por municipio.	FGN
Desarrollo social	7	Cobertura en educación	Cobertura neta acotado del 100%	MEN
	8	Cobertura en salud del régimen subsidiado	Porcentaje de afiliados al régimen de subsidio	MinProtección
	9	Tasa por desplazamiento – Recepción	Tasa por 100.000 habitantes	UARIV
Desarrollo económico	10	Acceso a cuentas de ahorro	Cuántas de ahorro por habitante mayor de 15 años	Asobancaria
	11	Cobertura de internet	Usuarios de internet fijo/Población	DIES CRC
Gobernabilidad (capacidad fiscal)	12	Recursos propios	Ingresos tributarios /(Ingresos totales + Regalías)	DNP-DDTS
	13	Dependencia de transferencias	Transferencias SGP/Ingresos totales	DNP-DDTS

Fuente: DPN (2015)

Definición: Luego de calculados indicadores de cada línea estratégica se hace un proceso de estandarización:

$$y_{itv} = \frac{x_{it} - Min_{xt}}{Max_{xt} - Min_{xt}}$$

Donde:

y_{itv} : Valor de la variable normalizada para el municipio i en periodo t.

x_{it} : Valor de la variable para el municipio i en el periodo t.

Min_{xt} : Valor mínimo de la variable en el periodo t.

Max_{xt} : Valor máximo de la variable en el periodo t.

t : Periodo en el que se ha hecho la evaluación del indicador (debe ser el mismo periodo para todos los indicadores del índice).

$$IVT_{it} = \sum_{c=1}^m P_c (M_{itc})$$

$$M_{itc} = \sum_{v=1}^n \rho_{vt}(y_{itv})$$

Donde:

IVT_{it} : Índice de Vulnerabilidad Territorial del municipio i en el periodo t.

M_{itc} : Valor de la categoría de línea estratégica c para el municipio i en el periodo t.

P_c : Ponderación de la categoría de línea estratégica c (Tabla 104).

ρ_{vt} : Ponderador de la variable v del periodo t (Tabla 104).

Tabla 104. Ponderadores para las líneas estratégicas y las variables correspondientes

Línea estratégica	Ponderador P_c (%)	Variable	Ponderador ρ_{nt} (%)
Atención humanitaria	18,07%	Tasa de desplazamiento- expulsión	100,00
Seguridad	28,8%	Tasa de homicidio	33,19
		Tasa de secuestro	28,92
		Hectáreas de coca	22,61
		Tasa de Hurto	15,28
Justicia	13,29%	Presencia de la fiscalía	100,00
Desarrollo social	12,10%	Cobertura en educación	44,59
		Cobertura en salud del régimen subsidiado	40,97
		Tasa por desplazamiento – Recepción	14,44
Desarrollo económico	15,57%	Acceso a cuentas de ahorro	50,00
		Cobertura de internet	50,00
Gobernabilidad (capacidad fiscal)	12,16	Recursos propios	50,00
		Dependencia de transferencias	50,00

Fuente: DPN (2015)

Para definir los rangos de interpretación se parte del método de intervalos naturales de Jenks (1963), el cual se utiliza para definir intervalos en series numéricas, con aplicaciones en cartografía. Este método busca la máxima optimización entre cada intervalo de datos minimizando la varianza intraclase, intensificado a su vez las diferencias entre las clases. En la Tabla 105 se muestran los promedios de los valores del IVT para el año 2012 obtenidos por el DNP, que con cada actualización deberían tener cambios basados en la técnica de clasificación.

Tabla 105. Niveles de vulnerabilidad asociados a los promedios de IVT para el año 2012

Nivel de vulnerabilidad	Promedio IVT
Baja	0.249
Media baja	0.103
Media	-0.007
Media alta	-0.090
Alta	-0.271

Fuente: DPN (2015)

Responsabilidad: Las actividades que puedan tener incidencia en la gobernabilidad local o en la generación de conflictos debido a evidencias históricas de estos procesos, deben incluir este índice dentro de su línea base social y sobre esta debe hacerse monitoreo. Es responsabilidad de las autoridades locales y nacionales la validación de este índice.

Recursos: Información oficial.

Periodicidad: Actualización anual.

Nivel de referencia: Municipio o región dentro de la que se encuentra la actividad.

Puntos de lectura: Unidades territoriales definidas como área de influencia del medio socio-económico.

INDICADORES ASOCIADOS A PLAGUICIDAS

148. Constante de Ley de Henry (H)

Objetivo: Describe la tendencia de un plaguicida a volatilizarse del agua o suelo húmedo, a partir de la presión de vapor, solubilidad en agua y peso molecular del plaguicida.

La presión de vapor es una medida de volatilidad de una sustancia química en estado puro, por lo que es importante para estimar la velocidad del paso del plaguicida al aire, desde el suelo o los cuerpos de agua superficiales, cuando estos han sido contaminados. La presión de vapor es directamente proporcional a la temperatura. A partir del valor que toma es posible estimar el comportamiento del plaguicida en el ambiente (Tabla 106).

Tabla 106. Comportamiento genérico de un plaguicida en función de su presión de vapor

Presión de vapor del plaguicida (Pascales)	Afinidad del plaguicida al suelo o agua	Comportamiento del plaguicida en el ambiente
$< 1.0 \times 10^{-8}$	Alta	Bajo potencial para volatilizarse: Se puede solubilizar en agua o ser retenido en suelo
$> 1.0 \times 10^{-3}$	Baja	Alto potencial para volatilizarse

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC (México)¹⁶

La solubilidad de un plaguicida es una medida que determina la concentración máxima que puede alcanzarse en un litro de agua, a una temperatura determinada, usualmente entre 20 y 25 °C. Generalmente varía entre 1 y 100,000 mg/L. Los plaguicidas muy solubles en agua tienen una baja adsorción o afinidad a los suelos, por lo que son fácilmente transportados del lugar de la aplicación, por la precipitación, la escorrentía o el riego, hasta cuerpos de agua superficial y/o subterránea.

Tabla 107. Comportamiento genérico de un plaguicida en función de su solubilidad

Solubilidad	Comportamiento del plaguicida
Baja	Puede tener afinidad por el suelo y acumularse en éste Puede sedimentarse en el suelo en la base de los acuíferos
Alta	Puede tener afinidad por el agua y puede solubilizarse Se puede transportar a mantos acuíferos Puede facilitarse la biodegradación del plaguicida

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC (México)¹⁷

¹⁶ http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas_fyq_plaguicidas.pdf

¹⁷ http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas_fyq_plaguicidas.pdf

Por su parte, el peso molecular se define como el peso de un mol de moléculas. Teniendo presente estas características la Constante de la Ley de Henry indica el potencial de un plaguicida para volatilizarse o ser transportado por el agua.

Definición:

$$H_c = \frac{p}{c}$$

Donde:

- H_c : Coeficiente de partición aire-agua
 p : Presión de vapor del plaguicida (Pa)
 c : Solubilidad en agua (mol. m⁻³)

También se puede calcular como:

$$H_c = \frac{p' \times PM \times 10^{-3}}{c'}$$

Donde:

- H_c : Coeficiente de partición aire-agua
 p' : Presión de vapor del plaguicida (mPa)
 PM : Peso molecular del plaguicida
 c' : Solubilidad en agua (ppm)

Cuando un plaguicida tiene una alta solubilidad con relación a su presión de vapor, tenderá a disolverse en agua. Por tanto, un valor alto de la Ley de Henry, indica que el plaguicida tiene un potencial elevado para volatilizarse del suelo húmedo, mientras que un valor bajo indica un mayor potencial de lixiviación (Tabla 108).

Tabla 108. Comportamiento genérico de un plaguicida en función de su constante de la Ley de Henry.

Rangos del valor (atm m ³ /mol)	Volatilidad del plaguicida	Características	Comportamiento
<3 x 10 ⁻⁷	No volátil	Constante (H) baja	El plaguicida puede disolverse en agua
3 x 10 ⁻⁷ a 1 x 10 ⁻⁵	Baja volatilidad	• Presión de vapor baja • Alta solubilidad • Tiene potencial para lixiviarse	
1 x 10 ⁻⁵ a 1 x 10 ⁻³	Volatilidad moderada	Constante (H) alta	El plaguicida puede evaporarse
>1 x 10 ⁻³	Alta volatilidad	• Presión de vapor alta • Solubilidad baja • Tiene potencial alto para volatilizarse del suelo húmedo	

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC (México)¹⁸

¹⁸ http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas_fyq_plaguicidas.pdf

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades relacionados con la importación, comercialización o distribución de plaguicidas, o cuando estos sean empleados de manera frecuente durante su ejecución.

Recursos: Equipos de laboratorio para la determinación de presión de vapor y la solubilidad del plaguicida.

Periodicidad: Esta medición debe ser realizada al producto comercial. Mientras que no haya cambios en la formulación del plaguicida el valor obtenido será válido, por lo cual no es factible establecer una frecuencia para la actualización de la medición.

Nivel de referencia: Ficha de seguridad del producto a emplear.

Puntos de lectura: Producto comercial.

149. Coeficiente de Adsorción de Carbono Orgánico (K_{oc})

Objetivo: Es una medida de la tendencia de un compuesto orgánico a ser adsorbido o retenido por los suelos o sedimentos. A este valor también se le conoce como coeficiente de adsorción suelo/agua o como coeficiente de adsorción.

Definición:

$$K_{oc} = \frac{k_D \times 100}{CO}$$

Donde:

K_{oc} : Coeficiente de adsorción

k_D : Coeficiente de distribución

CO : Porcentaje de carbono orgánico en el suelo = Porcentaje de materia orgánica / 1.72

Un K_{oc} elevado indica que el plaguicida se adhiere con firmeza a la materia orgánica del suelo, por lo que tenderá a permanecer en el sitio y la cantidad de ingrediente activo que llegará a las aguas superficiales o a los acuíferos será muy baja. En la Tabla 109 se relaciona el comportamiento del plaguicida en función de su coeficiente de adsorción de carbono orgánico.

Tabla 109. Comportamiento del plaguicida en función del coeficiente de adsorción de carbono orgánico

Adsorción del plaguicida al suelo			Valores del coeficiente
Muy débil	El plaguicida puede ser volátil	<10	K_{oc} bajo - El plaguicida puede distribuirse en cuerpos de agua o aire - El plaguicida puede no ser fijado a la materia orgánica del suelo - La vía de exposición al plaguicida puede ser la inhalatoria
Débil		10 a 100	
Moderada		100 a 1000	
De moderada a fuerte	El plaguicida puede ser soluble en grasa	1000 a 10.000	K_{oc} alto - El plaguicida se puede fijar en suelo, sedimento, biota y materia orgánica - El plaguicida puede moverse en aguas superficiales - La vía de exposición al plaguicida puede ser por la cadena alimenticia
Fuerte		10.000 a 100.000	
Muy fuerte		>100.000	

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC (México)¹⁹

Debido a la escala de posibles resultados es frecuente hacer referencia al valor del logaritmo en base 10 del K_{oc} o $\text{Log } K_{oc}$. En la Tabla 111 se muestran, a manera de ejemplo, los valores de $\text{Log } K_{oc}$ para algunos de los plaguicidas de uso frecuente en Colombia.

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades relacionados con la importación, comercialización o distribución de plaguicidas, o cuando estos sean empleados de manera frecuente durante su ejecución.

Recursos: Equipos de laboratorio

Periodicidad: Esta medición debe ser realizada al producto comercial. Mientras que no haya cambios en la formulación del plaguicida el valor obtenido será válido, por lo cual no es factible establecer una frecuencia para la actualización de la medición.

Nivel de referencia: Ficha de seguridad del producto a emplear.

Puntos de lectura: Producto comercial.

150. Coeficiente de Partición Octanol / Agua (K_{ow})

Objetivo: el coeficiente de partición octanol / agua o K_{ow} es una medida de cómo una sustancia química puede distribuirse entre dos solventes inmiscibles, agua (solvente polar) y octanol (solvente relativamente no polar). El K_{ow} proporciona un valor de la polaridad de un plaguicida, por lo que es utilizado frecuentemente en modelos para determinar cómo puede distribuirse en los tejidos animales. Debido a la escala que puede tomar el K_{ow} se suele emplear su logaritmo en base 10, como una propiedad fisicoquímica relacionada con la afinidad lipídica de los plaguicidas; así, altos valores de $\text{log } K_{ow}$ indican alta afinidad por la fracción lipídica, fácil transporte a través de las membranas biológicas y por lo tanto alto potencial de bioacumulación.

Definición:

$$K_{ow} = \frac{C_{octanol}}{C_{agua}}$$

Donde:

K_{ow} : Coeficiente de Partición Octanol / Agua

$C_{octanol}$: Concentración molar de la sustancia en octanol

C_{agua} : Concentración molar de la sustancia en el agua

En la Tabla 110 se relaciona el comportamiento del plaguicida en función de su K_{ow} mientras que en la Tabla 111 se muestran, a manera de ejemplo, los valores de $\text{Log } K_{ow}$ para los plaguicidas de uso frecuente en Colombia.

¹⁹ http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas_fyq_plaguicidas.pdf

Tabla 110. Comportamiento del plaguicida en función del K_{ow}

K_{ow}	Comportamiento del plaguicida
Alto	- El plaguicida puede fijarse con firmeza a materia orgánica, sedimento y biota - El plaguicida puede bioacumularse en grasa corporal de animales - La vía de exposición al plaguicida puede ser por la cadena alimenticia
Bajo	- El plaguicida puede no fijarse en materia orgánica - El plaguicida puede moverse en aguas superficiales, acuíferos y aire - La vía de exposición al plaguicida puede ser la inhalatoria

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC (México)²⁰

Tabla 111. Valores de Log K_{ow} y Log K_{oc} para los plaguicidas de uso común

Plaguicida	Log K_{ow}	Log K_{oc} (K_{oc} g/ml)
Carbofurán	1,80	1,37
Cipermetrina	5,30	4,93
Clorpirifos	4,30	3,70
Diazinón	3,69	2,81
Glifosato	-3,20	4,34
Malatión	2,75	2,34
Mancozeb	1,33	3,00
Paratión	3,83	3,88

Fuente: Narváez Valderrama et al. (2012)

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades relacionados con la importación, comercialización o distribución de plaguicidas, o cuando estos sean empleados de manera frecuente durante su ejecución.

Recursos: Equipos de laboratorio

Periodicidad: Esta medición debe ser realizada al producto comercial. Mientras que no haya cambios en la formulación del plaguicida el valor obtenido será válido, por lo cual no es factible establecer una frecuencia para la actualización de la medición.

Nivel de referencia: Ficha de seguridad del producto a emplear.

Puntos de lectura: Producto comercial.

151. Cociente de riesgo ambiental agudo (RQ_{agudo})

Objetivo: Determinar la relación de exposición y toxicidad que se presenta por el uso de plaguicidas en los proyectos, obras o actividades.

Definición:

$$CR = \frac{PEC \text{ suelo}}{Toxicidad \text{ aguda } DL_{50}}$$

²⁰ http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas_fyq_plaguicidas.pdf

Donde:

CR: Cociente de riesgo

PEC: Concentración ambiental estimada²¹

DL_{50} : Dosis Letal, cantidad mínima de una sustancia (generalmente expresada en mg/kg), que ocasiona la muerte de la mitad (50%) de una población de animales de prueba²².

Los resultados del indicador se interpretan de acuerdo con lo establecido en la Tabla 112.

Tabla 112. Interpretación del cociente de riesgo ambiental agudo

CR	Categoría
>1	Riesgo muy alto
1	Riesgo alto
0.1	Riesgo medio
0.01	Riesgo bajo
< 0.01	Riesgo insignificante

Fuente: TdR para importación de plaguicidas químicos para uso doméstico, industrial y salud pública (Ministerio del Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial., 2010)

Los resultados de los CRs muestran a los compartimientos ambientales que son más impactados o están más en riesgo por los diferentes ingredientes activos presentes en el ambiente.

Recursos: Equipos de laboratorio para la determinación de niveles de toxicidad en especies de la zona, donde se desarrollará el proyecto, obra o actividad.

Periodicidad: Esta medición y seguimiento debe ser realizada desde una medida de referencia o línea base del lugar donde se utilizarán plaguicidas y luego de su empleo debe ser monitoreado.

Nivel de referencia: De acuerdo con la ficha de seguridad del producto a emplear.

Puntos de lectura: Especies seleccionadas de las zonas donde se esté utilizando los plaguicidas.

152. Ecotoxicidad

Objetivo: Este indicador proporciona un valor estimado del grado de toxicidad de la sustancia. Para el caso de los plaguicidas el método empleado y avalado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es la Dosis Letal 50 (DL_{50}) que se define como la cantidad mínima de una sustancia (generalmente expresada en mg/kg), que ocasiona la muerte de la mitad (50%) de una población de animales de prueba.

²¹ Calculadora PEC de la Agencia Finlandesa de Seguridad y productos químicos (Tukes), la cual predice concentraciones en la capa de ozono a 5 cm. Representa la situación más crítica al no tener en cuenta factores como la filtración ni evaporación de las plantas.

²² Para identificar la Dosis Letal, es indispensable consultar las fichas de seguridad de los productos a emplear, así como revisar la bibliografía existente sobre la toxicidad en la especie, que se utilizará como referencia. Algunos sitios de referencia: (Pesticide Action Network North-America (PANNA) - www.pesticideinfo.org/ The EXTension TOXicology NETwork - extoxnet.orst.edu/pips/ghindex.html — Pesticide Toxicity Index for freshwater aquatic organisms (2da edición). — Handbook of Acute Toxicity of Chemicals to Fish and Aquatic Invertebrates)

En la Tabla 113, Tabla 114, Tabla 115 y Tabla 116 se relacionan las concentraciones de DL₅₀ para diferentes grupos de fauna.

Tabla 113. Categorización para DL₅₀ en roedores

Categoría	Tipo toxicológico	DL ₅₀ en mg/kg de masa corporal
Extremadamente tóxico	I	< 5.0
Altamente tóxico	II	5.0-50.0
Moderadamente tóxico	III	50.0-500.0
Ligeramente tóxico	IV	> 500.0

Fuente: Catálogo Cicoplafest, 1998²³

Tabla 114. Categorización para DL₅₀ y CL₅₀ oral en aves

Categoría	Toxicidad Oral Aguda DL ₅₀ (mg/kg)	Toxicidad Dietaria CL ₅₀ (ppm)
Extremadamente tóxico	< 10	<50
Altamente tóxico	10-50	50-500
Moderadamente tóxico	51 - 500	501-1000
Ligeramente tóxico	501 - 2000	1001 - 5000
Prácticamente no tóxico	>2000	>5000

Fuente: Technical Overview of Ecological Risk Assessment. Analysis Phase: Ecological Effects-Characterization.²⁴

Tabla 115. Categorización para especies acuáticas (peces e invertebrados acuáticos)²⁵

Toxicidad aguda	
CL ₅₀ (ppm)	Categoría
< 0.1	Extremadamente tóxico
0.1-1	Altamente tóxico
>1 - 10	Moderadamente tóxico
>10 - 100	Ligeramente tóxico
>100	Prácticamente no tóxico

Fuente: Technical Overview of Ecological Risk Assessment. Analysis Phase: Ecological Effects-Characterization.

Tabla 116. Categorización para abejas

Toxicidad aguda	
DL ₅₀ (µg/abeja)	Categoría
< 2	Altamente tóxico
2-11	Moderadamente tóxico

²³ http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas_fyq_plaguicidas.pdf

²⁴ http://www.epa.gov/oppefed1/ecorisk_ders/toera_analysis_eco.htm#Ecotox

²⁵ También empleado para lombriz de tierra como se indica en el TdR para importación de plaguicidas químicos para uso doméstico, industrial y salud pública

Toxicidad aguda	
DL50 (µg/abeja)	Categoría
>11	Prácticamente no tóxico

Fuente: Technical Overview of Ecological Risk Assessment. Analysis Phase: Ecological Effects-Characterization.

Definición: Se realizara con base en la definición de la dosis letal 50 (DL50) o la concentración letal (CL50) para el grupo biológico más sensible, de acuerdo con las tablas presentadas anteriormente.

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades relacionados con la importación, comercialización o distribución de plaguicidas, o cuando estos sean empleados de manera frecuente durante su ejecución.

Recursos: Equipos de laboratorio para la determinación de niveles de toxicidad en especies de la zona, donde se desarrollará el proyecto, obra o actividad.

Periodicidad: Esta medición aplica al producto y por tanto solo deberá ser realizada una vez mientras que no se modifique su formulación o composición química.

Nivel de referencia: De acuerdo con la ficha de seguridad del producto a emplear.

Puntos de lectura: El producto en su presentación y/o formulación comercial.

153. Persistencia

Objetivo: La persistencia de un plaguicida se define como la capacidad de retener sus características físicas, químicas y funcionales, durante un período limitado después de su aplicación (Tabla 117).

Debe diferenciarse de la vida media del plaguicida, la cual se define como el tiempo requerido para que el cincuenta por ciento (50%) del producto aplicado se descomponga o degrade. La descomposición depende de factores ambientales como la temperatura, el pH del suelo, los microorganismos del suelo, el clima, la exposición a la luz, la humedad y la concentración de oxígeno. Debido a que las sustancias resultantes de la descomposición de un plaguicida pueden presentar características tóxicas y tener vidas medias significativas, es importante conocer su comportamiento.

Si la vida media y la persistencia de un plaguicida es mayor a la frecuencia con la que se aplica, éste tenderá a acumularse en el ambiente. En la Tabla 117 se presenta una clasificación de los plaguicidas de acuerdo a su persistencia.

Tabla 117. Clasificación de los plaguicidas de acuerdo a su persistencia

Persistencia	Tiempo
Ligeramente persistente	Menor de 4 semanas
Poco persistente	De 4 a 26 semanas
Moderadamente persistente	De 27 a 52 semanas
Altamente persistente	De 1 a 20 años
Permanentes	Mayor de 20 años

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC (México)²⁶

Definición: Para evaluar este indicador se requiere establecer el tiempo de vida media y clasificar el producto según los rangos establecidos en la Tabla 117.

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades relacionados con la importación, comercialización o distribución de plaguicidas, o cuando estos sean empleados de manera frecuente durante su ejecución.

Recursos: Equipos de laboratorio para la determinación de niveles de toxicidad en especies de la zona, donde se desarrollará el proyecto, obra o actividad.

Periodicidad: Esta medición aplica al producto y por tanto solo deberá ser realizada una vez mientras que no se modifique su formulación o composición química.

Nivel de referencia: De acuerdo con la ficha de seguridad del producto a emplear.

Puntos de lectura: El producto en su presentación y/o formulación comercial.

154. Potencial de contaminación de agua subterránea

Objetivo: a partir de las propiedades de los plaguicidas, la Agencia de Protección Ambiental (EPA), de los Estados Unidos determinó algunos valores referentes como un indicador del potencial de contaminación de agua subterránea. Dichas propiedades se muestran en la Tabla 118.

Tabla 118. Potencial de contaminación de agua subterránea para plaguicidas

Propiedades químicas o físicas de los plaguicidas	Valores determinados
Solubilidad en agua	> 30 ppm
Constante de la Ley de Henry	< 10^{-2} atm m ³ /mol
Koc	< de 300 a 500
Vida media por Hidrólisis	> de 25 semanas
Vida media por Fotólisis	> de una semana

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, 1986, Pesticides in Groundwater: Background Document

Definición: Un producto plaguicida tendrá el potencial de contaminar el agua subterránea cuando cumpla con al menos una de las condiciones de la Tabla 118. En este sentido es un indicador cualitativo ya que su resultado es si presenta o no dicho potencial.

Responsabilidad: Proyectos, obras o actividades relacionados con la importación, comercialización o distribución de plaguicidas, o cuando estos sean empleados de manera frecuente durante su ejecución.

Recursos: Equipos de laboratorio para la determinación de los parámetros de Solubilidad en agua, Constante de la Ley de Henry, Koc, Vida media por Hidrólisis y Vida media por Fotólisis.

²⁶ http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas_fyq_plaguicidas.pdf

Periodicidad: Esta medición aplica al producto y por tanto solo deberá ser realizada una vez mientras que no se modifique su formulación o composición química.

Nivel de referencia: De acuerdo con la ficha de seguridad del producto a emplear.

Puntos de lectura: El producto en su presentación y/o formulación comercial.

BIBLIOGRAFÍA

- Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. In *Instituto Geológico y Minero de España* (p. 51).
- Aguilar Idáñez, M. J. (2014). Servicios Sociales Básicos. In *Diccionario internacional de derecho del trabajo y de la seguridad social* (pp. 1961–1969).
- Alarcón, L. (2017). Análisis de fragmentación y conectividad Ecológica entre relictos de cobertura vegetal asociada al área de influencia del Río Cravo Sur en el Municipio de Yopal - Casanare- Colombia. In *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Altamirano, C., & Meneses, L. (2018). Determinación de BTEX en aire ambiente del Distrito Metropolitano de Quito mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama. *InfoANALÍTICA*, 6(1), 25–37. <https://doi.org/10.26807/ia.v6i1.61>
- Angulo Salazar, R. C., Díaz Cuervo, Y., & Pardo Pinzón, R. (2011). Índice de Pobreza Multidimensional para Colombia 1997 - 2010. *Archivos De Economía*, 382.
- Arbeli, Z. (2009). Biodegradation of persistent organic pollutants (POPs): I the case of polychlorinated biphenyls (PCB). *Acta Biol. Colomb*, 14(1), 57–88.
- Arboleda G., J. A. (1998). Una propuesta para la identificación y evaluación de impactos ambientales. In *Manual de Evaluación de Impactos Ambientales de Colombia* (1st ed.). Ministerio del Medio Ambiente, Corporación Autónoma Regional del Magdalena, Deutsche Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- Archenti Zegarra, J. F. (2018). *Zonificación de la capacidad portante del suelo en la localidad de Laguna distrito de Lagunas, Alto Amazonas - región de Loreto* [Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto]. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.76.032109>
- Área Metropolitana Valle de Aburrá. (2018). *Formulación del plan de manejo ambiental de acuíferos del Valle de Aburrá. Parte II*.
- Arias-Castro, G. de J., & Martínez-Oropesa, C. (2016). Evaluación de la exposición al riesgo por vibraciones en el segmento mano brazo en compañías del sector metalmecánico. *Medicina y Seguridad Del Trabajo*, 62(245), 327–336.
- Aristizabal, B. H., Velez Upegui, J. J., Cortés Araujo, J. de la P., & Gonzales Duque, C. M. (2014). Hojas metodológicas. In *Definición de los indicadores de la línea base ambiental de caldas* (p. 226).
- Astudillo Romero, M. (2012). *Modelación de dispersión espacial de contaminantes del aire en la ciudad de Cuenca*. Universidad San Francisco de Quito.
- Bedmar, F., Costa, J. L., Gimenez, D., & Daniel, P. (2013). Comparación de dos métodos de obtención de índices para la estimación del riesgo de lixiviación de plaguicidas en dos perfiles de suelo. *AgriScientia*, 30(2), 69–78. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v30.n2.8991>
- Bernal, F. A., & Santander, J. P. (2014). Hoja metodológica del indicador Índice de retención y regulación hídrica. In *Estudio Nacional del Agua. Sistema de Información Ambiental. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM* (p. 16). Instituto de Hidrología, Meteorología

y Estudios Ambientales - IDEAM.

- Brunel, N., & Seguel, O. (2011). Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro Sur*, 39(1), 1–12.
- Calderón-Patrón, J. M., Moreno, C. E., & Zuria, I. (2012). La diversidad beta: medio siglo de avances. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(3), 879–891. <https://doi.org/10.7550/rmb.25510>
- CAR. (2017). *Demanda de agua subterránea en el acuífero priorizado en la zona franca de la cuenca media del Río Bogotá*.
- Casas-García, O., Betancur-Vargas, C. M., & Montañó-Erazo, J. S. (2015). Revisión de la normatividad para el ruido acústico en Colombia y su aplicación. *Entramado*, 11(1), 264–286.
- CEPAL. (2017). Indicadores no monetarios de pobreza: avances y desafíos para su medición. In *Serie Seminarios y Conferencias*.
- Chaparro, M., & Linares, C. (2017). *Evaluación del cumplimiento de los niveles de presión sonora (ruido ambiental) en la Universidad Libre Sede del Bosque*. Universidad Libre.
- CNAP, GEF, & PNUD. (2012). *Sistema de monitoreo e indicadores para el seguimiento de un grupo de especies exóticas invasoras en ecosistemas vulnerables en cuba* (pp. 1–31). Centro Nacional de Áreas Protegidas; Global Environment Facility; PNUD.
- Coava Pérez, J. C., & Tovar González, U. de J. (2011). *Caracterización de compuestos orgánicos volátiles (VOC's) por cromatografía de alta velocidad*. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201000498>
- Conesa, V. (2010). *Guía metodológica para la evaluación del Impacto Ambiental* (4a ed.). Mundi-Prensa Libros.
- Correa, R., & Bulla, P. (2012). *Hoja metodológica del indicador Anomalía de temperatura (Versión 1,00). Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales* (p. 12). IDEAM.
- Cortolima. (2015). *Plan de ordenación y manejo ambiental de la microcuenca de las que bradas las panelas y la balsa*.
- CVC, & Consorcio POMCA Quindío. (2017). *Actualización POMCA Río La Vieja* (p. 32).
- DAFP. (2012). *Guía para la construcción de indicadores de gestión*. Departamento Administrativo de la Función Pública.
- DANE. (2009). Metodología Índice de Valoración Predial. In *Dane*.
- DANE. (2012a). *Atlas estadístico. Colombia. Tomo I. Demográfico*.
- DANE. (2012b). *Atlas estadístico. Colombia. Tomo II social*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- DANE. (2012c). *Atlas estadístico. Colombia. Tomo III. Económico*.
- DANE. (2012d). *Glosario de términos. Gran Encuesta Integrada de Hogares GEIH* (p. 5).
- DANE. (2014). *Proporción de especies en peligro de extinción (Número de especies en alguna categoría de*

amenaza).

- DANE. (2017). *Hoja metodológica de indicadores. Intensidad energética*. Dirección de síntesis y cuentas nacionales. Cuenta satélite ambiental.
- DANE. (2019). *IPC actualización metodológica*. DANE. Información Para Todos.
- Danny Harvey, L. D. (1993). A guide to global warming potentials (GWPs). *Energy Policy*, 21(1), 24–34. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90205-T](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90205-T)
- Daza-Cruz, Y. X. (2020). *Apropiación humana de la producción primaria neta en sistemas de agricultura ecológica y convencional*. Universidad Nacional de Colombia.
- Deere, D. U., & Deere, D. W. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. In *Rock Classification Systems for Engineering Purposes* (pp. 91–101).
- Delgado Quintero, A. F., Gamba Valenzuela, L. M., & Salamanca, O. I. (2019). *Estudio de los indicadores hidrológicos de la cuenca del río San Francisco en el municipio de Chocontá - Cundinamarca*. Universidad Católica de Colombia.
- Díaz Poveda, V. C. (2019). *Evaluación de los compuestos orgánicos volátiles (COV) biogénicos y antropogénicos del municipio de Manizales*. Universidad Nacional de Colombia.
- DPN. (2015). *Índice de Vulnerabilidad Territorial: Resultados 2008-2012*. Departamento Nacional de Planeación.
- Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. E. (2016). *Geomecánica*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Duque, G. (2017). Geomorfología. In *Manual de geología para ingenieros* (p. 32). Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Erb, K. H., Krausmann, F., Gaube, V., Gingrich, S., Bondeau, A., Fischer-Kowalski, M., & Haberl, H. (2009). Analyzing the global human appropriation of net primary production - processes, trajectories, implications. An introduction. *Ecological Economics*, 69(2), 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.07.001>
- Escalante, T., & Morrone, J. (2002). Métodos para medir la biodiversidad. *Acta Zoológica Mexicana*, 85, 195–196.
- Escobar, C., & Duque, G. (2017). *Geotecnia para el trópico andino*. Universidad Nacional de Colombia.
- Escobar, C. E., & Duque, G. (2016). *Geotecnia para el trópico andino*.
- FAO. (n.d.). *Propiedades químicas del suelo*. Portal de Suelos de La FAO.
- Figueroa, P. (2014). *Evaluación de estructura horizontal y la diversidad florística en un bosque lluvioso del medio Magdalena, Hacienda San Juan del Carabe, Cimitarra - Santander*. Universidad del Tolima.
- FMI. (2006). *Manual del Índice de Precios al Consumidor: Teoría y Práctica*.
- Forero, L. C., Longo, M., Ramírez R., J. J., & Chalar, G. (2014). Índice de calidad ecológica con base en

- macroinvertebrados acuáticos para la cuenca del río Negro (ICERN-MAE), Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 62(April), 233. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i0.15790>
- Gaitán, M., & Cárdenas, P. A. (2017). *Guía para la elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Galindo, G Vergara, L. K. Cabrera, E. (2019). *Hoja metodológica del indicador de cambio en la superficie cubierta por bosque natural, versión 1.2* (pp. 1–11). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Insitituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Galindo, G., Vergara, L. k., & Cabrera, E. (2019). *Hoja metodológica del indicador Proporción de la superficie cubierta por bosque natural (Versión 1.2)* (p. 11). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Insitituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- García Rodríguez, M., Villaroya Gil, F., Fernández Escalante, A., & Montero Fernández, J. (2005). Propuesta de un sistema de indicadores medioambientales para la evaluación de impacto ambiental y seguimiento de actividades de regeneración hídrica mediante recarga artificial de acuíferos. *Tecnología y Desarrollo*, 3, 404.
- Garmendia, A., Salvador, A., Crespo, C., & Garmendia, L. (2005). *Evaluación de impacto ambiental*. Pearson education.
- Garrido Valero, M. S. (1993). Interpretación y análisis de suelos. In *Hojas divulgatorias* (Issue 5). Ministerio de agricultura, pesca y alimentación de España. <https://doi.org/10.14350/rig.58865>
- Gianelli, V., & Bedmar, F. (2017). Riesgo de lixiviación de imazapir en tres suelos de Argentina. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 33(3), 241–251.
- González Gómez, O. C., & Santander Durán, J. P. (2016). *Hoja metodológica del indicador Anomalía de precipitación (Versión 1,10). Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Servicio de Información Ambiental* (p. 14). IDEAM.
- González Martínez, M. del P. (2016). *Análisis comparativo de la huella hídrica en agroecosistemas de la microcuenca Alto Río Ubaté*. 167.
- Granjeiro, M. L., Marlúcia, M., Santiago, F., Maria, C., & Vidal, S. (2009). Razões iônicas e índices de langelier e larson no estudo hidrogeoquímico das águas subterrâneas no município de quixeré - ceará. *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Griffin, M. J. (2012). Vibraciones. In *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. OIT.
- Guerrero Abreu, J., & Perez Alejo, J. L. (2006). Las radiaciones no ionizantes y su efecto sobre la salud humana. *Revista Cubana de Medicina Militar*, 35(3), 1–7.
- Guevara, J. (2017). *Fundamentos para el estudio, identificación y determinación metodológica de la capacidad de intercambio catiónico una propuesta para suelos asociados al cultivo de caña de azúcar (Saccharum officinarum L.) en el departamento del Valle del Cauca* [Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.51.6.1173>
- Guillot Monroy, G. H., & Pinilla Agudelo, G. A. (Eds.). (2017). *Estudios ecológicos en humedades de Bogotá. Aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo* (Primera). Universidad Nacional de Colombia.

- Gurrutxaga, M. (2003). *Índices de fragmentación y conectividad para el indicador de biodiversidad y paisaje de la Comunidad Autónoma del País Vasco* (p. 32). Gobierno Vasco.
- Haberl, H. (1997). Human Appropriation of Net Primary Production as an environmental indicator: Implications for Sustainable Development. *Ambio*, 26(3), 143–146.
- Haberl, H., Erb, K.-H., & Krausmann, F. (2007). Human appropriation of net primary production (HANPP). *International Society for Ecological Economics*.
- Haberl, H., Erb, K. H., Krausmann, F., Loibl, W., Schulz, N., & Weisz, H. (2001). Changes in ecosystem processes induced by land use: Human appropriation of aboveground NPP and its influence on standing crop in Austria. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 929–942. <https://doi.org/10.1029/2000GB001280>
- Haberl, H., Weisz, H., Amann, C., & Bondeau, A. (2006). The Energetic Metabolism of the EU-15 and the USA. Decadal Energy Input Time-Series with an Emphasis on Biomass. *Journal of Industrial Ecology*, 10(4), 151–171. <https://doi.org/10.1162/jiec.2006.10.4.151>
- Hamdani, A. H., Hutabarat, J., & Haryanto, A. D. (2019). The Acid-Base Accounting (ABA) of Overburden Rock to Predict Acid Mine Water in Kasai Coal Mining, Indonesia. *Oriental Journal of Chemistry*, 35(3), 1103–1111. <https://doi.org/10.13005/ojc/350325>
- Harrould-Kolieb, E., & Savitz, J. (2009). *Acidificación: ¿Cómo afecta el CO2 a los océanos?* Oceana.
- Heinrich-Böll-Stiftung. (2017). *Atlas de los océanos. Hechos y cifras de las amenazas a nuestros ecosistemas marinos* (1st ed.).
- Hernández, A. M. (2013). *Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad del Aire - ICA (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia* (p. 13). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IAvH. (2017). *Biodiversidad 2016, Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. (L. A. Moreno, G. I. Andrade, & L.-F. Ruiz-Contreras (Eds.)). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- IDEAM. (n.d.). *Metodología para la evaluación aproximada de la carga contaminante* (pp. 1–30).
- IDEAM. (2007). *Sólidos Suspendidos Totales* (pp. 1–4).
- IDEAM. (2010a). *Estudio sobre la variabilidad de la temperatura superficial del mar en el Caribe Colombiano* (p. 42). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2010b). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2013). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1.00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial*. (p. 12). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2016a). *Indicador Índice de Vulnerabilidad Hídrica por desabastecimiento* (p. 13). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

- IDEAM. (2016b). *Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL)* (pp. 1–14). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2018). *Informe nacional de residuos o desechos peligrosos en Colombia*.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua*. Ideam.
- INVEMAR - ANH. (2013). *Manual de métodos de ecosistemas marinos y costeros con miras a establecer impactos ambientales*.
- IPCC. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In *Climante Change: the physical science basis*. The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Iriondo, M. H. (2009). *Introducción a la geología* (Segunda).
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics. Earthquakes, Uplift, and Landscape* (Second). Prentice Hall.
- Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D., & Velásquez, H. (2008). Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 24(4), 171–182.
- MADS. (2012). *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE)*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MADS, & WWF-Colombia. (2012). *Guía de las especies migratorias de la biodiversidad en Colombia*. Aves.
- Mancero, X., & Feres, J. C. (2001). *El método de las necesidades básicas insatisfechas (NBI) y sus aplicaciones en America Latina*. Serie estudios estadísticos y prospectivos. CEPAL.
- Martínez-Alier, J., Demaria, F., & Walter, M. (2016). Changing social metabolism and environmental conflicts in India and South America. *Journal of Political Ecology*, 23, 467–491.
- Martínez-Rodríguez, M. D. Á., & Pinilla-A., G. A. (2015). Valoración de la calidad del agua de tres ciénagas del departamento de Cesar mediante macroinvertebrados asociados a eichhornia crassipes. *Caldasia*, 36(2), 305–321. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v36n2.47489>
- Martínez Bernal, L. F. (2019). *El turismo en los Parques Naturales Nacionales de Colombia: Una evaluación del impacto ambiental de esta actividad y sus perspectivas en un escenario postconflicto* [Universidad de Las Palmas de Gran Canaria]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27920.35846>
- Mas, J.-F., & Correa Sandoval, J. (2000). Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida “Los Petenes”, Campeche, México. *Investigaciones Geográficas*, 1(43), 42–59. <https://doi.org/10.14350/rig.59123>
- Matias, S. R. (2015). Los servicios públicos domiciliarios en Colombia: Su prestación, regulación y control. *Reforma y Democracia*, 63, 165–194.
- Decreto 3100 de 2003, (2003).
- Menéndez, S., & García, A. (2013). *Procedimiento de protección radiológica para la manipulación de fuentes no encapsuladas utilizadas en la instalación radiactiva central (IRC) de la facultad de medicina de la*

Universidad Complutense de Madrid (UCM) (pp. 1–71). Universidad Complutense de Madrid.

Miller-Pérez, C., Sánchez-Islas, E., Mucio-Ramírez, S., Mendoza-Sotelo, J., & León-Olea, M. (2009). Los contaminantes ambientales bifenilos policlorinados (PCB) y sus efectos sobre el Sistema Nervioso y la salud. *Salud Mental*, 32(4), 335–346.

Minambiente. (2018). *Términos de referencia para la elaboración del diagnóstico ambiental de alternativas - DAA en proyectos lineales de infraestructura de transporte* (p. 65). Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, ANLA.

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (2018). *Emisiones de gases acidificantes y eutrofizantes, y de gases precursores del ozono troposférico* (p. 6).

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. (2006). *Resolución 0627 de 2006*.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2012). *Diagnostico nacional de salud ambiental*. (p. 368).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Política Nacional Para La Gestión Integral De La Biodiversidad Y Sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE)*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631* (p. 62).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial*.

Ministerio de Cultura de Perú. (2015). *22 indicadores de cultura para el desarrollo en Peru*.

Ministerio de Salud y Protección Social. (2005). *Política Nacional de Prestación de Servicios de Salud*.

Ministerio del Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *TdR para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la importación de plaguicidas químicos para uso doméstico, industrial y salud pública*.

Minsalud, & Minambiente. (2015). *Proyecto De Manual Para La Gestion Integral De Residuos Generados En La Atencion En Salud Y Otras Actividades* (pp. 1–52).

Minsalud, & Minambiente. (2020). *Manual para la gestión integral de residuos generados en la atención en salud y otras actividades, y se dictan otras disposiciones* (pp. 1–46).

Molano, S., & Torres, M. (2018). *Índices geomorfológicos como herramientas para la caracterización de la actividad neotectónica del sistema de fallas de soapaga entre los municipios de corrales y pesca*. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia.

Mora Goyes, M. F., Rubio, J., Ocampo, R., & Barrera Cataño, J. I. (2015). Catálogo de especies invasoras del territorio CAR. *Pontificia Universidad Javeriana, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR*, 238.

Moreno, A. (2016). *Química atmosférica de compuestos orgánicos volátiles oxigenados*. Universidad de Castilla - La Mancha.

Moreno, C. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad. M&T–Manuales y Tesis SEA* (Programa

Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. (Ed.); Vol. 1). Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe, UNESCO.

Moreno, D., Quintero, J., & López, A. (2010). Metodos para identificar , diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS* 78, 25–33.

Motos, G. (2019). *Analisis de indicadores de movilidad urbana sostenible*. Universodad Politécnica de Cartagena.

Muñoz-Pedrerros, A. (2004). La evaluación del paisaje: una herramienta de gestión ambiental. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77(1), 139–156. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2004000100011>

Narváez Valderrama, J. F., Palacio Baena, J. A., & Molina Pérez, F. J. (2012). Persistencia de plaguicidas en el Ambiente y su ecotoxicidad: Una revisión de los procesos de degradación natural. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 27–38.

Navarrete-Ramirez, S. M. (2014). Protocolo Indicador Variación línea de costa: perfiles de playa. Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). In *Serie de publicaciones generales del Invermar* (Vol. 73). Invermar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invermar.

Nij Patzán, J. E. de J. (2009). *Guía práctica para el cálculo de capacidad de carga en cimentaciones superficiales, losas de cimentación, pilotes y pilas perforadas*. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Noguera-Urbano. (2017). El endemismo: diferenciación del termino, metodo y aplicaciones. *Acta Zoologica Mexicana*, 33(1), 89–90.

Offstein, N., & Hillón, L. C. (2003). La distribución de la tierra rural en Colombia y su relación con variables socioeconómicas. *Planeación y Desarrollo*, XXXIV(2), 27.

OMS. (2015). *Manual de la OMS sobre Radón en interiores. Una perspectiva de salud pública*. Organización Mundial de la Salud.

Organización Panamericana de la Salud, & Ministerio de Salud. (2012). Lineamiento para la vigilancia sanitaria y ambiental del impacto de los olores ofensivos en la salud y calidad de vida de las comunidades expuestas en áreas urbanas. *Convenio Cooperación Técnica No.485/10*, 141.

Ortega-Guerrero, G. A. (2018). El reto de los conflictos ambientales en el escenario del postconflicto en Colombia: reflexiones para la construcción y discusión sobre las perspectivas de paz y derechos ambientales. *Gestión y Ambiente*, 21, 162–182. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2supl.77959>

Peña, V., & Rodríguez, C. P. (2017a). *Hoja metodológica del indicador: Tasa anual de cambio de la superficie cubierta por diferentes coberturas*. Sistema de Idicadores Ambientales de Colombia. Insitituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.

Peña, V., & Rodríguez, C. P. (2017b). *Proporción de la superficie cubierta por diferentes tipos de coberturas (Hoja metodológica versión 1,00)* (pp. 1–11). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Peña, V., & Sánchez, R. (2018). *Proporción del área de suelos degradados por salinización (Versión 1,0)* (p. 12). Grupo Suelos y Tierras, Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Pereda, M. A., & Velarde, M. A. (2019). *Análisis geotécnico para determinar el riesgo por caída de rocas en los asentamientos humanos, Quebrada Huaycoloro, Lima*. Universidad Ricardo Palma.
- Pérez, B. ., & López, M. . (2014). Evaluación de contaminación del aire debido a elementos radiactivos naturales. *Universidad Católica Del Perú*, 814–824.
- Pinilla Agudelo, G. A. (2010). An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogotá city, Colombia. *Ecological Indicators*, 10(4), 848–856. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.006>
- Pinilla Agudelo, G. A. (2016a). Algunas experiencias en el uso de índices limnológicos en Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1Supl), 241–248. <https://doi.org/10.15446/abc.v21n1supl.51073>
- Pinilla Agudelo, G. A. (2016b). Experiences in the Use of Limnological Indices in Colombia. *Acta Biologica Colombiana*, 21(1, S), 241–248.
- Pinilla Agudelo, G. A., Duarte Coy, J., & Vega Mora, L. (2010). Índice de estado limnológico (IEL) para evaluar las condiciones ecológicas de las ciénagas del canal del dique, Colombia. *Acta Biologica Colombiana*, 15(2), 169–188.
- Prat, N., Ríos-Touma, B., Acosta, R., & Rieradevall, M. (2009). Los macroinvertebrados como indicadores de la calidad de agua. In E. Domínguez & H. R. Fernández (Eds.), *Macroinvertebrados Bentónicos Sudamericanos. Sistemática y Biología*. Publicaciones Especiales. Fundación Miguel Lillo.
- Proyecto CERI-ACDI Colombia. (1999). *Manual de manejo de PCBs para Colombia*. Ministerio del Medio Ambiente y Douglas White and Associates.
- Puy Santín, A. J. (2005). *Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Quijano, J. (2014). *Parámetros morfométricos, geomorfológicos y correlación estructural en cinco cuencas hidrográficas de la Cuenca Amagá*. Universidad EAFIT.
- Ramirez, D. P., Mayorga, N. C., & Díaz, L. J. (2018). *Hoja metodológica del indicador Variación de la superficie de los ecosistemas naturales continentales (VSENC) (Versión 1.10)* (p. 12). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Insitituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Ríos-Touma, B., Acosta, R., & Prat, N. (2014). The Andean biotic index (ABI): Revised tolerance to pollution values for macroinvertebrate families and index performance evaluation. *Revista de Biología Tropical*, 62(2), 249–273. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i0.15791>
- Riss, W., Ospina, R., & Gutiérrez, J. D. (2002). Establecimiento De Valores De Bioindicación Para Macroinvertebrados Acuáticos De La Sabana De Bogotá. *Caldasía*, 24(1), 135–156.
- Rojas-Higuera, P. J., & Pabón-Caicedo, J. D. (2015). Sobre el calentamiento y la acidificación del océano mundial y su posible expresión en el medio marino costero colombiano. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(51), 201. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.135>
- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 254. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.335>

- Romero Díaz, M. A., & Bermúdez López, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía (Física)*, 12, 47–62.
- Romero, J. H., Palacios, O. L., & Escobar, B. S. (2017). Estimación de la sobreexplotación producida en el acuífero Valle de Celaya (México). *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(4), 127–138. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-08>
- Romo-Gómez, C., Camacho-López, C., Marmolejo-Santillán, Y., & Otazo-Sánchez, E. M. (2019). Deterioro de la capa de ozono estratosférico: una revisión. *Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías*, 13, 1–5. <https://doi.org/10.29057/icbi.v7i13.3428>
- Saldarriaga, G. de J., & Carrillo, L. M. (2012). Hoja Metodológica de Indicadores Ambientales Índice de Uso del Agua. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM y Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE.*, 1.01(96), 17.
- Sanchez Carrillo, S., Alvarez Cobelas, M., Angeler, D. G., & Vizcayno Muñoz, C. (2000). Tasas de acreción y características de los sedimentos actuales en el parque nacional Las Tablas de Daimiel (ciudad real). *Estudios Geológicos*, 56(5–6), 239–250.
- Sánchez, G. P., & Sumba, A. P. (2019). *Caracterización de suelos inestables frente a deslizamiento en dos laderas situadas en los alrededores de la ciudad de Cuenca*. Universidad de Cuenca.
- Sánchez, R., Mendoza, E., Otero, J., & Alvarez, J. (2017). *Proporción del área de suelos degradados por erosión (Hoja metodológica versión 1.0)* (p. 10). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Sbarato, R. D., & Rubio, M. (2018). Monitoreo de COV's en el aire de la ciudad de Córdoba, Argentina. *Revista de Salud Pública*, XXII(2), 62–68.
- Schandl, H., Grünbühel, C., Haberl, H., & Weisz, H. (2002). Handbook of Physical Accounting Measuring biophysical dimensions of socio-economic activities MFA - EFA - HANPP. *Social Ecology Working Paper*, 73.
- Servicio Geológico Colombiano. (2018). *Amenaza por movimientos en masa tipo flujo de las cuencas de las quebradas Taruga, Taruquita, San Antonio y El Carmen y los ríos Mulato y Sangoyaco, municipio de Mocoa, escala 1:5000* (pp. 0–107).
- Siad, L., & Megueddem, M. (1998). Stability analysis of jointed rock slope. *Mechanics Research Communications*, 25(6), 661–670. [https://doi.org/10.1016/s0093-6413\(98\)00085-8](https://doi.org/10.1016/s0093-6413(98)00085-8)
- Sierra Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico* (1st ed.). Universidad de Medellín. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Silva, L. A. (2008). *Manual de monitoreo del agua para el investigador local* (IAVH (Ed.); Vol. 53). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sinchi. (2009). *Índice de Gini de la tierra rural* (pp. 1–6). Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - Sinchi.
- Singh, B., & Goel, R. K. (2012). Rock Mass Rating. In *Engineering Rock Mass Classification* (pp. 45–62). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385878-8.00006-9>

- Skousen, J., Simmons, J., McDonald, L. M., & Ziemkiewicz, P. (2002). Acid-Base Accounting to Predict Post-Mining Drainage Quality on Surface Mines. *Journal of Environmental Quality*, 31(6), 2034–2044. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.2034>
- Tecnalia, & DNP. (2017). *Estudio en la intensidad de utilización de materiales y economía circular en Colombia para la misión de Crecimiento Verde* (p. 276).
- Tecnalia, & DNP. (2018). *Estudio en la intensidad de utilización de materiales y economía circular en Colombia* (p. 121).
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wileyand Sons, Inc.
- Trujillo, E., Martínez, V., & Flores, N. S. (2008). Ajuste del equilibrio químico del agua potable con tendencia corrosiva por dióxido de carbono. *Informacion Tecnológica*, 19(6), 89–101. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.3967it.07>
- Turner, M. G., Gardner, R. H., & O'Neill, R. V. (2001). *Landscape ecology in theory and practice*.
- UICN. (2012). *Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.
- Valencia González, Y., Yepes-García, J. A., & Echeverri-Ramírez, O. (2015). Evaluación por diferentes métodos del potencial de colapso de algunos suelos residuales en los Valles de Aburrá y San Nicolás. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 38, 60–64. <https://doi.org/10.15446/rbct.n38.49026>
- Velasco, M. (2005). *La Calidad Del Aire Asociado Con Metales Pesados En La Ciudad De Manizales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., & Umaña, A. M. (2004). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. *Programa Inventarios de Biodiversidad; Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*, 236.
- Water Footprint Network. (2002). *Manual para la evaluación de la huella hídrica*. 44.
- Zhang, L. (2016). Determination and applications of rock quality designation (RQD). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3), 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.008>
- Ziyad, E. R. (2014). Relationship between tectonic activity, fluvial system and river morphology in the Dohuk catchment, Iraqi Kurdistan. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 20(1), 91–100. <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10539> Abstracts