



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

“Propuesta de evaluación  
hidromorfológica en manantiales de la  
Subcuenca del río Magdalena, Ciudad de  
México: una aproximación basada en  
datos ecológicos, usos y  
aprovechamientos locales”

T E S I S

Que para obtener el título de:

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

Presenta:

**LISSET GABRIELA TEMIS GARCÍA**

Directora de tesis:

**DRA. ANGELA PIEDAD CARO BORRERO**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

2021





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos de la alumna  
Temis  
García  
Lisset Gabriela  
55 12 49 79 10  
Universidad Nacional Autónoma de México  
México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
313310061
2. Datos de la tutora  
Dra.  
Angela Piedad  
Caro  
Borrero
3. Datos del sinodal 1.  
Dra.  
Marisa  
Mazari  
Hiriart
4. Datos del sinodal 2.  
Dr.  
Javier  
Carmona  
Jiménez
5. Datos del sinodal 3.  
Dra.  
Lyssette Elena  
Muñoz  
Villers
6. Datos del sinodal 4.  
Dra.  
Jejanny Lucero  
Hernández  
Martínez
7. Datos del trabajo escrito  
Propuesta de evaluación Hidromorfológica en manantiales de la Subcuenca del río Magdalena, Ciudad de México: una aproximación basada en datos ecológicos, usos y aprovechamientos locales.

72 Pp  
2021

# Agradecimientos académicos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por darme la oportunidad de crecer profesionalmente en la mejor institución del país y fundarme una perspectiva diferente de la vida.

A la **Facultad de Ciencias**, que fue mi segunda casa durante mi formación universitaria y me permitió conocer muchas personas que ahora admiro.

A la **Licenciatura de Ciencias de la Tierra**, por enseñarme que no hay una verdad absoluta, por formarme desde muchas disciplinas, mostrarme el camino que ahora recorro y darme la oportunidad de aprender de sus profesores.

A la **Dra. Angela Caro Borrero**, por el recibimiento que siempre tuvo conmigo, por darme la oportunidad de colaborar con ella y su equipo, por las enseñanzas y paciencia dada. Gracias por ser una mujer admirable.

A la **Dra. Marisa Mazari, Dra. Lyssette Muñoz, Dra. Lucero Hernández** y el **Dr. Javier Carmona** por brindarme parte de su valioso tiempo para leer esta tesis y darme comentarios para siempre mejorar.

Al **Dr. Javier Carmona**, por la ayuda en las colectas realizadas, en su apoyo y conocimientos en la identificación de algas, y por siempre tener una sonrisa y comentario positivo para toda ocasión.

Al **Mtro. Edgar Caro**, por su arte con fotografías para la ilustración de este trabajo.

Al **Laboratorio de Ecosistemas de Ribera**, por su apoyo en las colectas y análisis de algunos datos del trabajo.

Este proyecto se desarrolló dentro del Programa de **Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, UNAM (IN307219)** y Programa de **Apoyo a Proyectos de Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza, UNAM (PE201118)**.

# Agradecimientos personales

Mi profundo agradecimiento a mi hermana que siempre ha creído en mí durante todo el proceso, me ha apoyado incondicionalmente y ha sido uno de mis ejemplos a seguir para no rendirme.

Gracias a mis padres de los cuales he aprendido bastante y siempre tratan que me supere. Gracias a mi papá, por ser mi cobijo y respiro cuando la vida intenta darme una lección. Gracias a mi mamá por siempre mostrarme que todo tiene solución y que todo con amor es mejor. Los amo.

Gracias a Emilio, el cual ha sido uno de mis pilares durante la carrera, sin tu amor y paciencia no hubiera sido lo mismo. Me has mostrado otro mundo al amarte.

Gracias a Susi, por ser mi maestra y ángel durante toda la carrera, te admiro mucho. Gracias a Chavita por cada risa, enojo, apoyo y broma junto a ti, eres mi esperanza en la humanidad.

Gracias a Ari, Aranza, Dani, Isaac, Luis, lancito, Rubio y Omar, gracias por las risas, locuras y viajes juntos, quedan por siempre en mi corazón.

Muchas gracias a Edday, eres una persona increíble, gracias por siempre tener un buen consejo para mí.

Gracias a mis maestros de la carrera y a las Doctoras que me orientaron en mi titulación y servicio social, son el ejemplo de la científica que quiero llegar a ser.

*Este trabajo es dedicado a Alfonso,  
sin tí nada de esto hubiera sucedido.*

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| Agradecimientos.....   | ii        |
| Resumen.....   | 1         |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>   |           |
| 1.1 Importancia y riesgo de los manantiales .....              | 2         |
| 1.2 Integridad ecológica, límites y aproximaciones .....       | 3         |
| 1.3 Manantiales dentro de las grandes ciudades.....            | 6         |
| <b>2. MARCO CONCEPTUAL</b>                                     |           |
| 2.1 Aguas subterráneas y su relación con los manantiales ..... | 8         |
| 2.2 Clasificación de los manantiales .....                     | 9         |
| 2.3 Indicadores biológicos de la calidad ambiental.....        | 12        |
| 2.4 Calidad hidromorfológica.....                              | 13        |
| 2.5 Criterios de evaluación hidrogeomorfológica.....           | 14        |
| <b>3. JUSTIFICACIÓN.....</b>                                   | <b>21</b> |
| <b>4. OBJETIVOS</b>  |           |
| 4.1 Objetivo general.....                                      | 22        |
| 4.2 Objetivos particulares.....                                | 22        |
| <b>5. METODOLOGÍA</b>  |           |
| 5.1 Área de estudio.....                                       | 23        |
| 5.2 Localización de manantiales.....                           | 24        |
| 5.3 Trabajo de campo.....                                      | 27        |
| 5.4 Trabajo de laboratorio.....                                | 28        |
| <b>6. RESULTADOS</b>   |           |
| 6.1 Caracterización ambiental .....                            | 31        |
| 6.2 Análisis y adaptación del protocolo HYQI .....             | 35        |
| 6.3 Protocolo piloto .....                                     | 39        |
| 6.4 Tipificación y calificación de manantiales .....           | 43        |
| 6.5 Identificación de algas .....                              | 50        |
| 6.6 Tabla resumen.....   | 53        |

|  |    |
|--|----|
| <b>7. DISCUSIÓN</b>                                      |    |
| 7.1 Análisis fisicoquímico .....                         | 55 |
| 7.2 Comparación entre HYQI e ICaHMa .....                | 56 |
| 7.3 Tipificación y calificación de los manantiales ..... | 58 |
| 7.4 Validación de calidad con algas.....                 | 59 |
| <br>   |    |
| <b>8. CONCLUSIONES</b> .....                             | 61 |
| <b>9. Bibliografía</b> .....                             | 63 |

## **ANEXOS**

|  |    |
|--|----|
| Anexo I. Índice de calidad hidromorfológica de manantiales y arroyos. .... | 69 |
|--|----|



# Resumen

Los manantiales son descargas naturales de agua subterránea que emergen a la superficie, generados por cambios geométricos e hidrológicos en el sistema de agua subterráneo. En la Subcuenca del Río Magdalena los manantiales son primordiales para uso y consumo humano, así como tributarios del Río Magdalena. Por lo que, conocer el estado de vulnerabilidad y salud de estos es importante para garantizar la provisión y calidad del recurso hídrico.

En este sentido, el objetivo de esta investigación fue adaptar un protocolo de calidad hidromorfológica para manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena. Para ello, se realizaron adaptaciones al protocolo *Hydromorphology Index Quality* (Ortiz, 2017), modificando algunos criterios para evaluar manantiales. Se realizaron evaluaciones hidromorfológicas, físicas, químicas y validaciones biológicas en 13 sitios (manantiales/arroyos) de la subcuenca. Las principales modificaciones realizadas al protocolo fueron: evaluación en un mínimo de 10 metros de circunferencia del sitio, calificar la retención de agua de acuerdo con la filtración permitida en cada presa, e incorporación de puntos como presencia de desechos orgánicos e inorgánicos y protección al manantial. Como principal resultado se propone el protocolo de evaluación Índice de Calidad Hidromorfológico para Manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena (ICaHMa).

Así mismo la evaluación reveló manantiales/arroyos con descarga baja y continua, que no sobrepasaron los límites establecidos para nutrientes en las normas oficiales mexicanas – NOM-127-SSA1-1994 y NOM-001-SEMARNAT-1996 – para consumo humano. Respecto a las algas, el género *Nostoc* sp., presentó la mayor frecuencia de aparición. Finalmente, la evaluación de la calidad hidromorfológica con el protocolo ICaHMa mostró dos manantiales con calidad óptima, siete con calidad media y dos con calidad mala, sin tener algún sitio en calidad deficiente, la más baja factible.

# 1. Introducción

## 1.1 *Importancia y riesgo de los manantiales*

El estudio de manantiales tiene gran importancia, ya que representa la transición entre las aguas subterráneas hacia aguas superficiales, además de ser un reflejo de la cantidad, calidad y el estado del acuífero (Brune, 1975). Barquín y Scarsbrook (2008) sugieren que los manantiales deben ser considerados como un ecotono de tres vías, la transición de aguas subterráneas, a aguas superficiales y a los ecosistemas terrestres. La gestión incluye muchos de los mismos principios que se guían los recursos de aguas superficiales y subterráneas (Kresic y Stevanovic, 2010).

Los manantiales influyen directamente en las corrientes y otros cuerpos de agua superficial en los que se descargan, incluidos todos los ecosistemas dependientes, pueden ser fuente de alimento al flujo de ríos, proporcionando la mayor cantidad de caudal, haciendo que el río sea permanente, o pueden solo contribuir cuando hay poca precipitación, haciendo que no se seque, para ello el porcentaje de aportaciones al caudal base respecto al total del río depende de la geología y el clima del sitio (Sahuquillo, 2009; Kresic y Stevanovic, 2010).

De acuerdo con las características (químicas, físicas, morfológicas y biológicas) del manantial, puede determinar, modelar y modificar el ecosistema a su alrededor, como la zona ribereña más cercana y la del mismo manantial (Sada y Pohlmann, 2002). Investigaciones en Estados Unidos, Reino Unido y Nueva Zelanda han clasificado a los manantiales como “puntos calientes” (*Hot spots*) para la biodiversidad acuática y terrestre (Scarsbrook *et al.*, 2007; Sada y Pohlmann, 2002), presentando una flora y fauna distintiva con altos niveles de endemismo local, particularmente entre los animales de poca capacidad de dispersión (por ejemplo, caracoles, anfípodos y algas) (Knott y Jasinska, 1998).

Con la creciente demanda de agua y por los costos bajos de energía y recursos económicos que requiere un manantial –ya que surgen de manera natural a la superficie y sin necesidad de bombeo (Vargas, 2002)- son una fuente potencial de abasto ya sea para consumo, uso doméstico o actividades económicas, tales como agricultura, ganadería o acuicultura, así como para el mantenimiento de los ecosistemas. Es por eso que para una mayor captación del líquido se crean presas artificiales cercanas a los manantiales o a los ríos.

Además, para zonas de bajos recursos económicos o rurales, en donde la infraestructura para el acceso al agua es de poco alcance, los manantiales son fuentes estratégicas y de obtención primaria de agua, la cual, en apariencia no está limitada, es gratuita y de buena calidad.

De forma contraria, también existen riesgos en estos cuerpos de agua que pueden modificar la cantidad o calidad de los manantiales. Las causas pueden ser originadas de forma natural o antropogénica, y también, ser generadas desde el acuífero que alimenta el manantial -zonas de recarga-, en la transición del agua de subsuelo a superficie y/o en el mismo manantial -área *in situ*-, que impactan negativamente la salud del ecosistema (Rodríguez *et al.*, 2003).

Springer *et al.*, (2008), proponen los compuestos geoquímicos más comunes que los impactan, los cuales se componen de ocho grupos: aniones y cationes principales (cloruro, sulfato, carbonato, calcio, sodio, potasio), constituyentes menores (hierro, borato, dióxido de sílice, carbonato / cloruro, aguas triples), indicadores de contaminación (selenio y coliformes fecales), marcadores útiles (isótopos estables, isótopos radiactivos, elementos de tierras raras), alcalinidad, concentración total de sólidos disueltos y conductancia específica, pH y concentraciones de nutrientes (*i.e.* nitratos y fosfatos).

En las zonas de infiltración al acuífero los causantes de contaminación pueden ser el uso de plaguicidas y aumento en la salinización del suelo por agricultura, desechos de animales (heces fecales y organismos en descomposición) por la ganadería, zona de desechos humanos como fosas sépticas, pozos negros, fugas de tanques de gas/gasolina, tuberías de almacenamiento y/o liberación de aguas residuales domésticas no tratadas con residuos de jabón o productos químicos para uso doméstico (Kresic y Stevanovic, 2010; Sahuquillo, 2009). Estos últimos son más dañinos cuando son en grandes cantidades e implican altas concentraciones, y se relacionan con la presencia de restaurantes, zonas urbanas en expansión o industrias cercanas a la zona de recarga o al manantial.

Las causas de contaminación *in situ* son varias, las generadas por actividades humanas, como la ganadería o pastoreo, donde las heces fecales cerca del manantial pueden explicar la presencia de posibles patógenos intestinales generadas por mamíferos, incluyendo al hombre. La presencia de basura orgánica o inorgánica generados por falta de educación, uso recreativo de la zona y/o costumbres culturales como rituales espirituales; o las causas naturales, como la presencia de maleza próxima al manantial generando la descomposición de materia orgánica cercana y facilitando la presencia de

pájaros y roedores cercanos a la corriente de agua que nidifican o establecen sus madrigueras contaminando con sus excretas, o el aumento de iones que se agregan al contacto con roca al emerger a la superficie, cambiando el patrón de componentes del agua (Rodríguez *et al.*, 2003).

Las modificaciones a la cantidad de agua están directamente relacionadas con el nivel freático del acuífero. Acciones como la extracción excesiva de agua, el cambio de uso de suelo en zonas de recarga como pavimentación o tala excesiva de árboles, y la disminución de precipitación (sequías), son causantes de la disminución de las aguas subterráneas (SEMARNAT, 2015). En cuanto a causas naturales, los sismos, modifican los parámetros geométricos e hidrológicos del sistema de agua subterráneo generando la disminución del cauce, el cierre del manantial o la creación de un manantial en otro sitio (Sahuquillo, 2009).

El cambio en los flujos superficiales también puede alterar el flujo de agua del manantial. Por ejemplo, la canalización y la regulación de los ríos pueden reducir la interconectividad entre los flujos superficiales y el almacenamiento de aguas subterráneas (Hancock, 2002) y, por lo tanto, afectar negativamente los flujos de los mismos. Estos factores de riesgo contribuyen a la afectación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, modificando los manantiales y disminuyendo la posibilidad de accesibilidad de agua limpia y por lo tanto su uso potencial para diferentes usos (Rodríguez *et al.*, 2003).

## **1.2 Integridad ecológica, límites y aproximaciones**

De acuerdo con Kaar (1993), la integridad ecológica es la suma de elementos, entre la diversidad biológica y los procesos ecológicos por los que pasa el ecosistema para llegar a su estado actual. Un sistema posee integridad cuando sus características ecológicas dominantes como elementos de composición, función, estructura, y procesos ecológicos, ocurren en intervalos naturales de variación, pudiendo resistir y recuperarse de la mayoría de las perturbaciones ocasionadas por la dinámica ambiental natural o interrupciones humanas (Parrish *et al.*, 2003).

En la evaluación de la Integridad Ecológica de cuerpos acuáticos influyen diferentes factores como: la estructura física del hábitat, las fuentes de energía, interacciones bióticas, calidad del agua y régimen del flujo, los cuales se centran y se ve con mayor facilidad reflejados en la evaluación biológica (Karr y Chu, 2000), ya que todos los factores nombrados influyen la estructura y composición de las comunidades o ensambles biológicos del sitio.

Es importante mencionar que dentro de las evaluaciones de Integridad Ecológica de cuerpos acuáticos no son clasificados los manantiales, siendo así una limitación para la evaluación certificada de los mismos. Además, como ya se mencionó, las evaluaciones existentes se basan principalmente en observación de organismos que habitan en los ríos o la vegetación que los rodea, lo cual también es un área de investigación poco desarrollada para el caso de los manantiales.

Pese a la ausencia de formas de Evaluación de Integridad Ecológica para manantiales, Barquín y Scarksbrook (2008), mencionan que, para que estos se consideren en un estado saludable, es necesario evitar todos los riesgos antes mencionados; además de comentar que la principal forma de evaluar es en la zona de transición, esto es entre aguas subterráneas a superficiales, es decir, en la zona donde se genera principalmente la vegetación nativa. Localizar los riesgos en las zonas de infiltración puede llegar a ser una tarea compleja, porque se requiere de conocimientos específicos sobre la geología del sitio.

Con el fin de hacer una evaluación más acertada para manantiales se analizan las evaluaciones de ríos, que son cuerpos de agua que pueden presentar similitudes. Sin embargo, es importante mencionar que los manantiales tienen peculiaridades que requieren de un sistema de evaluación propio. Las evaluaciones principalmente usadas para ríos son:

- El índice multimétrico *Index of Biotic Integrity* (IBI), que se basa en la integridad biótica utilizando comunidades de peces (Karr, 1981). En algunas instituciones como *Watershed Science Institute* (2015), se considera que el IBI es un medio confiable para evaluar el efecto de perturbación humana en arroyos y cuencas. Esta evaluación está basada en la integridad de la biodiversidad que habita el río, a diferencia de otros índices que solo permiten evaluar propiedades químicas o físicas para conocer la calidad del agua. El índice es ampliamente reconocido en Estados Unidos, lo que permite que sea utilizado en diferentes tipos de escurrimientos. La versión original contiene doce métricas que reflejan la riqueza y la composición de especies, número y abundancia, organización y función trófica, comportamiento reproductivo, y la salud de peces individuales; además la puntuación oscila entre 60 (mejor) y 12 (peor). Las versiones más recientes generalmente conservan la mayoría de las métricas originales, pero algunas se han modificado para mejorar la sensibilidad a la degradación ambiental en una región o tipo de escurrimiento en particular.
- *Rapid Bioassessment Protocols* (RBPs), con enfoques milimétricos desarrollado en Estados Unidos por Plafkin en 1989, evalúa la integridad del recurso acuático,

comparando comunidades biológicas (peces, invertebrados y perifiton), hábitats (propiedades físicas, régimen de flujo, etcétera) y calidad del agua con condiciones de referencia empíricamente definidas como sitios de referencia reales, datos históricos y/o modelado o extrapolación (Barbour *et al.*, 1999). Los RBPs originales se desarrollaron en dos fases, la primera fase se centró en el desarrollo y refinamiento de los protocolos para organismos bentónicos. La segunda fase implicó la adición de protocolos análogos enfocados en la evaluación de ensambles de peces.

- *River Invertebrate Prediction and Classification System* (RIVPACS), desarrollado en Reino Unido por Wright en 1995, es un modelo predictivo que compara la composición observada de fauna de macroinvertebrados contra la fauna que se espera encontrar en la zona de un sitio en ausencia de estrés ambiental. La fauna esperada se predice a partir de un pequeño conjunto de variables ambientales del sitio (variables geográficas, geológicas y descriptores de hábitat), que se consideran relativamente estables en el tiempo y con un deterioro mínimo (Oliveira y Cortés, 2006). Este sistema es derivado de AusRivAS creado por Parson y Norris en 1996 en Australia.

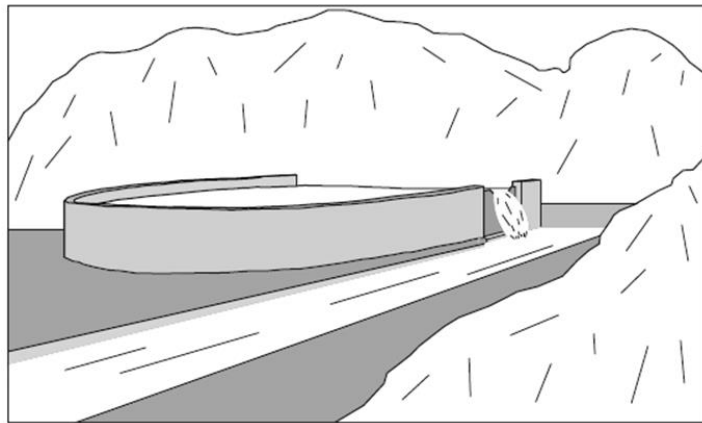
### **1.3 Manantiales en las grandes ciudades**

Desde la antigüedad, es muy común que las ciudades se ubiquen cerca de cuerpos de agua, ya sean superficiales o subterráneas, pues les garantiza a las poblaciones humanas la accesibilidad a la misma y la prosperidad de la comunidad. En el caso del agua subterránea, es de bajo costo y la mejor opción cuando no hay cuerpos superficiales de agua cerca, es por ello, que los manantiales han sido clave para el desarrollo y estabilidad de las grandes ciudades en todo el mundo (Kresic y Stevanovic, 2010; Saruquillo, 2009).

Con el aumento de la población, también aumentan las necesidades, entre ellas el agua, por lo que, el aprovechamiento de los manantiales, y en general de cualquier recurso hídrico, también se incrementan. Los grandes asentamientos humanos que conforman las ciudades, tienden a explotarlos, utilizándolos en usos domésticos, la agricultura, la ganadería, industria, o en la generación de energía, llegando incluso a la explotación intensiva y trayendo como consecuencia la sequía y/o extinción de los mismos.

En algunos países desarrollados, como es el caso de Estados Unidos, se implementan programas a nivel nacional y estatal para la prevención de contaminación y vulnerabilidad de los manantiales, como ejemplos, el Programa de Evaluación de Fuentes de Agua, Programa de Protección de Cabeceras de Manantiales y el Programa de la Ley de Reautorización y Enmiendas del Superfondo (Kresic, 2009). Las leyes, programas y normas toman en cuenta el tiempo y la dependencia de los manantiales a

largo plazo por lo que algunas optan por la conservación total del cuerpo de agua y de su fuente de suministro subterráneo, es decir, implementar zonas de conservación en el área circundante al sistema de agua, no realizando cambios de uso de suelo en donde se infiltra (zonas de recarga) o simplemente resguardándolos instalando límites para su acceso y potencial contaminación por fuentes antropogénicas. Algunas otras ciudades, para la protección del cuerpo de agua y donde el manantial por su cantidad de descarga lo permite, implementan infraestructura que maneja el agua direccionándola o evitando que corra y se mantenga como un embalse (Figura 1), pero la prevención e implementación más eficaz para la conservación del agua siempre será la educación pública (Kresic y Stevanovic, 2010).



**Figura 1.** Pequeña presa semielíptica construida alrededor de un manantial en el piedemonte y atada a la roca. Fuente: Kresic y Stevanovic, 2010.

## 2. Marco conceptual

### 2.1 *Aguas subterráneas y su relación con manantiales*

El agua subterránea es aquella que se encuentra en el subsuelo, la cual, sufrió un proceso de infiltración, generalmente en las partes altas de la cuenca, a partir de precipitaciones en zonas de formaciones muy permeables como rocas ígneas extrusivas, calizas, etcétera, y por aportes de cauces de arroyos, ríos y lagos (Cruickshank, 1992). El agua subterránea se localiza dentro de acuíferos -agua que se encuentra confinada por roca no porosa o impermeable- o se encuentra fluyendo, ya sea en el mismo subsuelo o hacia la superficie, contribuyendo a ríos, lagos, humedales o formando manantiales.

Los manantiales son originados por parámetros geométricos e hidrológicos del sistema de agua subterránea (Custodio-Llamas, 1983), es decir, son descargas naturales de agua subterránea que salen a la superficie, formados por cambios horizontales o verticales en la conductividad hidráulica del sistema, en donde el nivel de saturación en el acuífero corta la superficie topográfica (Vargas, 2002). También, pueden emerger a la superficie a través de fallas de roca, fracturas o depresiones (Death *et al.*, 2004). Debido a esto, los manantiales se conocen como una interfaz entre las aguas superficiales y las subterráneas; por lo que, al estar directamente relacionados, algún cambio en la dinámica de un componente modificará también la dinámica del otro (Kresic y Stevanovic, 2010).

La geomorfología y el tejido geológico, es decir, los cambios en su forma de la roca como la tectónica del sitio, juegan un papel clave en la aparición de manantiales (Kresic y Stevanovic, 2010) ya que determina la dirección del flujo hacia la superficie, y el tipo de roca madre del acuífero que contiene el agua determinará las características fisicoquímicas que la caracterizarán, como son los minerales, las sales, la temperatura, pH, alcalinidad, etcétera (van der Kamp, 1995).

Como se menciona, las características fisicoquímicas del agua subterránea son resultado de su interacción con las rocas que forman el acuífero. La mayoría de las aguas de manantial son soluciones acuosas diluidas con concentraciones de especies disueltas en el intervalo de cientos de miligramos por litro. Dicha concentración generalmente se conserva a lo largo de las distintas épocas del año. Con ello, existe un patrón de iones presentes en estas aguas, los cationes: calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ), y los aniones: bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), y cloruro



(Cl<sup>-</sup>) son los de mayor presencia. La diferencia entre las aguas de un manantial y otro radican en la cantidad de cationes y/o aniones anteriormente mencionados, en el total de la concentración de especies disueltas, en la temperatura y en la presencia de gases disueltos como el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Kresic y Stevanovic, 2010).

## **2.2 Clasificación de los manantiales**

Existen diferentes tipos de manantiales, dependiendo de las características que se observen o sean tomadas en cuenta para su clasificación. Algunos tipos de *manantiales primarios* -de acuerdo a su cavidad de descarga- son: “**Manantial de Orificio**”, cuando la cavidad de donde emana a la superficie es visible; “**Manantial de Filtración**”, los manantiales que no tienen un orificio visible, pero se observa que el área alrededor está humedecida, y que, generalmente está cubierto por sedimentos y/o tierra; y, “**Manantial de fractura o fisura**” cuando el agua emana de fallas o rupturas de roca consolidada (Kresic y Stevanovic, 2010).

De la misma forma, existen otros tipos, como los *manantiales secundarios*, que están cubiertos por grandes rocas o cantidades de materia orgánica que no permite localizar como tal al manantial; los *manantiales sumergidos*, que se encuentran dentro de grandes cuerpos de agua; o *manantiales termales*, que poseen características químicas diferentes a las del agua potable, como mayor dióxido de carbono o de radón (Kresic y Stevanovic, 2010).

La clasificación dependerá del parámetro que se esté midiendo del manantial, si se toman en cuenta características físicas, químicas, culturales y ecológicas, en particular este último, aún tiene un gran vacío dentro de la investigación, por lo que hace más complicado hacer una clasificación general (Springer-Stevens, 2008). Los parámetros utilizados principalmente para su clasificación son: regímenes de velocidad de descarga y uniformidad, el carácter hidráulico que genera la descarga, la estructura geológica y geomorfológica, la temperatura y la calidad del agua (Kresic y Stevanovic, 2010).

Springer y Stevens en 2008 hacen una clasificación de los manantiales basada en la hidrología y en su forma de emerger, relacionados con la biodiversidad que presentan, de los cuales los más utilizados para uso humano son:

**Helócreno:** generalmente emergen de forma difusa en entornos de ciénegas (pantanos, praderas húmedas), con bajo gradiente; a menudo de fuentes difusas y/o múltiples que se filtran de acuíferos poco profundos y no confinados. Según Toth (1966) los describe como agujeros de manantiales con lodo (mezcla de arena, limo, arcilla y

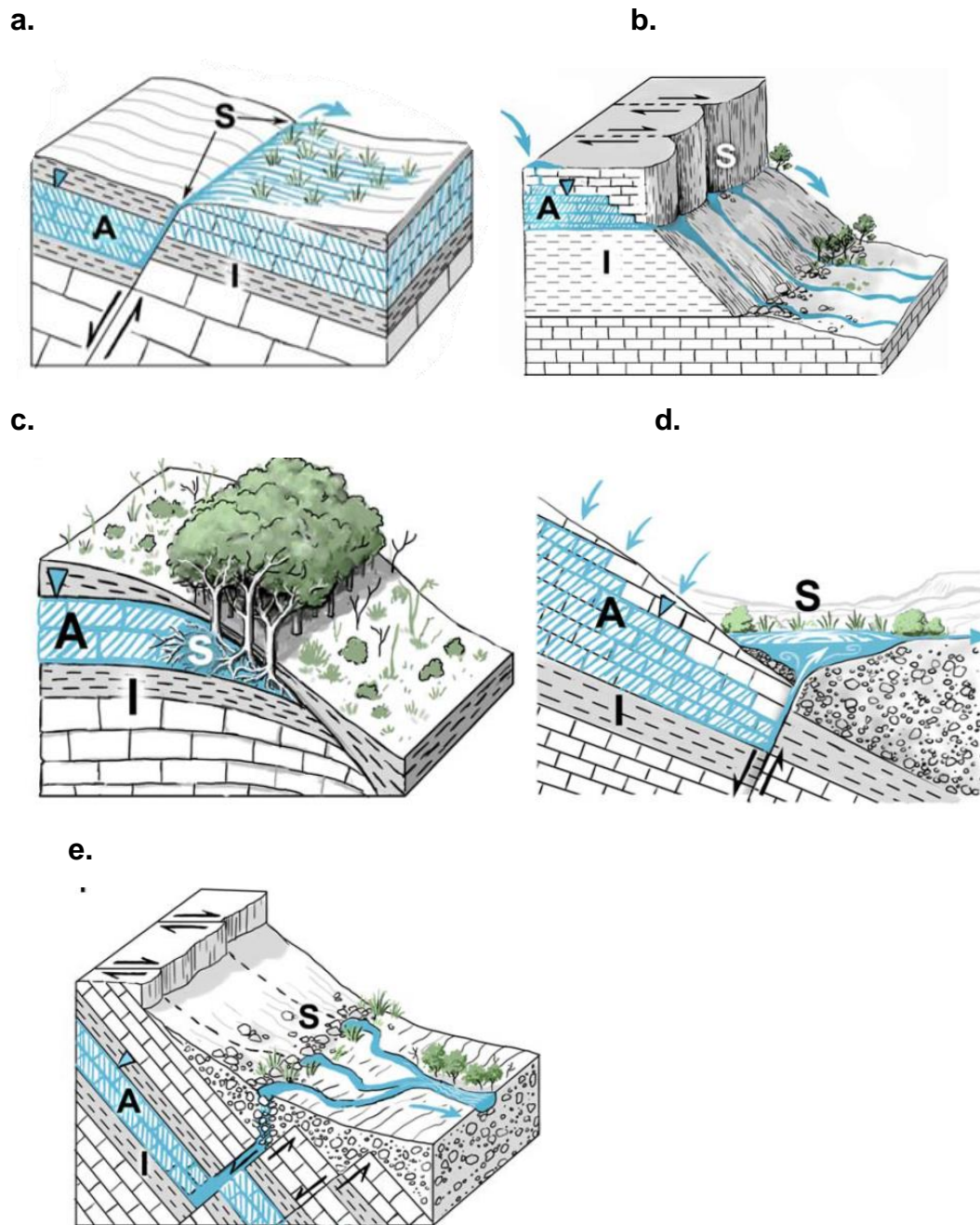
agua), típicamente salinos, lo que lleva a la aparición de halófitos. Otros helócrenos, pueden presentar agua dulce, pero bajas concentraciones de oxígeno y especies de soporte características de los humedales, o pueden tener aguas termales y presentar principalmente bacterias (*Fig. 2 a*).

**Pendiente** (*Hillslope*): emerge de acuíferos confinados o no confinados en una pendiente notoria (30-60°); a menudo con múltiples fuentes que pueden ser difusas. Son manantiales de ladera, los cuales pueden llegar a exhibir una gran cantidad de microhábitats (*Fig. 2 b*).

**Hipocreno**: manantial enterrado donde el flujo no alcanza la superficie, generalmente debido a una descarga muy baja y una alta evaporación o transpiración. Los manantiales de este tipo representarían un sitio con la menor cantidad de descarga y las entradas más bajas de agua atmosférica. Las investigaciones de este tipo, indican que comúnmente soportan el desarrollo de especies de plantas halotolerantes (altas concentraciones salinas) y tolerantes a sequías (*Fig. 2 c*).

**Limnócreno**: se producen cuando las descargas de acuíferos confinados o no confinados emergen como una o más piscinas lénticas. Aunque los manantiales del tipo limnócreno, pueden tener estanques y especies acuáticas, su temperatura y química relativamente uniformes pueden hacer que existan especies diferentes que en un cuerpo de agua adyacente dominado por agua superficial (*Fig. 2 d*).

**Rheocreno**: manantial que fluye, emerge en uno o más canales de corriente. Los manantiales dominados por el flujo generado pueden ser hábitats suficientemente estables para permitir la microadaptación evolutiva y, en última instancia, la especiación, mientras que los sistemas dominados por el flujo de la superficie suelen estar ocupados por especies tipo maleza y generalistas (McCabe, 1998) (*Fig. 2 e*).



**Figura 2.** Clasificación de los manantiales basada en la hidrología de descarga; **a.** Helócreno; **b.** Pendiente (*Hillslope*); **c.** Hipócreno; **d.** Limnócreno; y **e.** Rheócreno. Mientras que **A** es acuífero, **I** es el estrato impermeable, **S** fuente del manantial, el triángulo invertido representa nivel freático o superficie piezométrica, y las flechas negras muestran las líneas de falla (Fuente: Springer y Stevens, 2008).

Otra clasificación, es la basada en usos y costumbres locales que el ser humano le confiere a los manantiales y que también dependen de las características del mismo, como pueden ser la cantidad de caudal, temperatura, cantidad de sales, o la facilidad de acceso a los mismos. De esta forma, sus usos generales son:

- a) Consumo humano y de uso doméstico.
- b) Uso agrícola y/o ganadero o agropecuario.
- c) Turístico y recreativo.
- d) Industrial (incluye embotellamiento de agua).

### **2.3 Indicadores biológicos de la calidad ambiental**

En general, existen tres tipos de monitoreo de la calidad de los cuerpos de agua: los métodos químicos, los físicos y los biológicos. Este último, se basa en diferentes rasgos de las comunidades biológicas para hacer inferencias sobre el estado de conservación y calidad ecológica de un cuerpo de agua; el establecimiento de los organismos que muestran cambios debido a las alteraciones en el ecosistema recibe el nombre de “Indicador biológico”. Estos indicadores se basan a menudo en el uso de rasgos ecológicos de la población como presencia/ausencia, abundancias, dominancia, entre otros atributos biológicos, que constituyen una unidad de medición sobre la salud del ecosistema, mostrando cambios a lo largo del tiempo y el espacio, que integran la respuesta conjunta de la comunidad seleccionada como bioindicadora. Los bioindicadores ideales son las especies que son relativamente fáciles de observar, de coleccionar, y que son suficientemente abundantes y frecuentes como para permitir la replicabilidad del muestreo (Ospina y Peña, 2004). Es importante mencionar que este tipo de monitoreo es considerado como una aproximación relativa, ya que el ecosistema donde habita el organismo bioindicador está determinado por características climáticas y geológicas (Stoermer y Smol, 1999).

Un bioindicador acuático, señala algún proceso o estado del sistema en el cual habita, por ejemplo, la contaminación en el sistema se ve reflejada en la modificación de la estructura poblacional, la aparición y proliferación de especies asociadas a determinados aportes de nutrientes o sustancias químicas y la desaparición rápida o gradual de la población inicial en forma total o parcial (Montejano *et al.*, 1999). Algunos de los organismos, que son principalmente utilizados como bioindicadores acuáticos, son el grupo de los macroinvertebrados, las macroalgas y las diatomeas, ya que son organismos que constituyen una parte importante en la cadena trófica en los cuerpos de agua (Ferrato y Cole, 1990; Cortés *et al.*, 2013).

Específicamente las comunidades de algas bentónicas, presentan una importancia particular en los ciclos biogeoquímicos, la retención de nutrientes, la formación y estabilidad de los sedimentos y contribución a la modificación de atributos físicos como la velocidad de corriente (Stevenson, 1996; Graham y Wilcox, 2000). Además, responden a impactos antropogénicos, como el enriquecimiento de nutrientes (eutroficación), sustancias tóxicas, o metales pesados (Wang y Lewis, 1997). Los hábitos de fijación de nutrientes de la mayoría de las especies de algas hacen que sean afectadas directamente por los cambios físicos y químicos de la columna de agua (Levine, 1984), ofreciendo información ambiental sobre el ecosistema que habitan. En la mayoría de las algas, los efectos por contaminación del agua traen por consecuencia la disminución de la biomasa algal en especies no adaptadas a tolerar estas nuevas condiciones y por consiguiente la reducción de la productividad del sistema o, por el contrario, las nuevas condiciones favorecen la aparición de especies resistentes a la contaminación que pueden convertirse en indicadoras de condiciones ambientales (Peña *et al.*, 2005).

No obstante, las algas son organismos ideales para mostrar el estado del cuerpo de agua, es necesario tener experiencia para identificar las diferentes especies y como consecuencia el reconocimiento de los distintos estadios y fases de sus ciclos de vida (Carmona *et al.*, 2016).

La evaluación del ecosistema acuático por medio de bioindicadores es parte de las evaluaciones que se requieren para hacer un monitoreo completo, y que debe estar respaldado por evaluaciones físicas, químicas e hidromorfológicas, y viceversa (Nardini *et al.*, 2008).

#### **2.4 Calidad hidromorfológica.**

El término hidromorfología se ha desarrollado como una disciplina que vincula la hidrología y la geomorfología (Newson y Large 2006), haciendo referencia a la consideración de cualquier modificación al régimen de flujo, transporte de sedimentos, morfología de ríos y la movilidad del canal lateral (Clean Water Act., 1972). La calidad hidromorfológica asegura procesos fluviales clave, como la erosión activa, el transporte de sedimentos, disipación del flujo de energía, mantenimiento y renovación de formas fluviales, intercambios de energía, agua y materia orgánica con la llanura de inundación (Nardini *et al.*, 2008).

La evaluación hidromorfológica se centra en la presencia de organismos y hábitats físicos, ya que se ha reconocido que es un componente importante en estudios ecológicos, que explican la composición y estructura, sobrevivencia y mantenimiento de

las comunidades biológicas (Fernández *et al.*, 2011; Naiman *et al.*, 1993; Ward *et al.*, 2001; Kern *et al.*, 2002), siendo un conjunto de parámetros altamente reconocidos en la evaluación de ecosistemas de agua dulce. Además, los procesos hidromorfológicos también proporcionan servicios ambientales como la reducción de la acción erosiva durante las inundaciones en infraestructuras y asentamientos, depuración de contaminantes, recarga de acuíferos, etcétera (Nardini *et al.*, 2008).

La calidad hidromorfológica, además de la calidad fisicoquímica y biológica, es un elemento clave para conocer la calidad ecológica de un cuerpo de agua. Los indicadores básicos en ríos, que son generalmente evaluados y que, al ser modificados podrían dañar a largo plazo el ecosistema acuático y terrestre adyacente son (Dăscălița, 2010; Ramos-Merchante y Prenda, 2015):

- Régimen Hidromorfológico
  - o Caudales e hidrodinámica del flujo de las aguas
  - o Conexión con masas de agua subterránea
- Continuidad del flujo
- Condiciones morfológicas
  - o Variación de la profundidad y anchura del río
  - o Estructura y sustrato del lecho del río
  - o Estructura de la zona de ribera

## **2.5 Criterios de Evaluación Hidrogeomorfológica**

Para determinar el estado ecológico de sistemas acuáticos es importante la evaluación del funcionamiento hidrogeomorfológico, porque en él se garantiza la protección de los elementos del sistema y sus relaciones (Ollero *et al.*, 2007).

Al igual que la evaluación de integridad ecológica, son escasos los índices o protocolos de evaluación hidrogeomorfológica para los manantiales, es por ello que se presentan los índices para ríos principalmente utilizados al ser los cuerpos de agua más monitoreados y con mayor parecido a los manantiales.

**2.5.1** El Índice de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) evalúa principalmente ríos y escurrimientos, pero puede utilizarse para costas, lagos y humedales. La evaluación está compuesta por los siguientes elementos:

- Parámetros químicos: se evalúa oxígeno disuelto, pH, temperatura y conductividad eléctrica.
- Toxicidad algal: microcistina y cilindrospermopsina.
- Macroinvertebrados bentónicos.
- Perifiton.
- Indicador de contaminación fecal.
- Ensamblaje de peces.
- Caracterización física del hábitat: en el que se observa el perfil y las secciones de la zona riparia. La evaluación se lleva a cabo en una parcela de 20 metros de largo por 10 metros hacia tierra, iniciando en el margen de la orilla llena en ambos lados del río.

Los métodos de evaluación del hábitat físico hacen énfasis en los componentes del perfil de Thalweg -medición de profundidad máxima del canal, determinación de presencia de sedimentos de entre 10 a 15 intervalos igualmente espaciados en cada una de las 11 secciones transversales del canal-, las secciones transversales litorales/ribereñas y en las evaluaciones morfológicas del cuerpo de agua, como son el canal, ancho y alto de la bancos y la vegetación ribereña, además de calificar la presencia humana y sus posibles impactos. Esta evaluación se basa en cuatro calificaciones de cada parámetro: 0-5: pobre, 6-10: marginal, 11-15: subóptimo y 16-20: óptimo.

Sus parámetros a evaluar son:

- i) **SUSTRATO EPIFAUNAL/CUBIERTA DISPONIBLE:** evalúa la cantidad de sustrato favorable para la colonización de los organismos, incluye la cantidad relativa y variedad de estructuras naturales en el arroyo, como adoquines, rocas grandes, árboles caídos, troncos y ramas, así como orillas socavadas, disponibles como refugios, alimentación o sitios de desove y funciones de vivero de macrofauna acuática.
- ii)
  - a. **SUSTRATO EMBEBIDO:** califica la cantidad de rocas que se encuentran rodeados o cubiertos por limos, arenas o barro en el fondo del arroyo, ya que esto ayuda al desove de macroinvertebrados.
  - b. **CHARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO EN ZONAS DE REMANSO:** evalúa el tipo, condición y variedad de sustratos que se encuentran en el canal, ya que entre mayor variedad mayor será la capacidad de soportar vegetación y organismos.
- iii)
  - a. **COMBINACIÓN DE LOS RÉGIMENES DE VELOCIDAD/PROFUNDIDAD:** la diversidad del hábitat se relaciona con la velocidad y profundidad de corriente. Mayor

diversidad de hábitats se relacionan con la presencia de los cuatro patrones (1) lento-profundo, (2) lento-poco profundo, (3) rápido-profundo y (4) rápido-poco profundo.

b. VARIABILIDAD DE LA ZONA DE REMANSO: califica la cantidad de tipos y agrupaciones que se encuentran en las corrientes, según el tamaño y profundidad. Los cuatro tipos básicos de canal son (1) grandes y poco profundas, (2) grandes y profundas, (3) pequeñas y poco profundas, (4) y pequeño y profundo. Entre mayor cantidad de agrupaciones de tipos básicos de corriente mayor diversidad acuática.

iv) DEPOSITACIÓN DE SEDIMENTOS: evalúa la cantidad de montículos o agrupación de sedimentos en la corriente, al existir gran cantidad de ellos significa que hay inestabilidad en el ambiente y cambios constantes, que no son favorables para los organismos.

v) ESTADO DEL FLUJO DEL CANAL: cuando el canal del río no se encuentra completamente cubierto por agua afecta a los organismos acuáticos, ya que limita la cantidad de sustrato del hábitat de los mismos. Este parámetro evalúa la cantidad del canal que se encuentra cubierta por agua.

vi) ALTERACIÓN DEL CANAL: cambios en la corriente, canalización, deformación o desvío del flujo natural, o estructuras de bancos en el presente o en el pasado.

vii) a. FRECUENCIA DE RÁPIDOS: mide la secuencia de rápidos y, por lo tanto, la heterogeneidad que se produce en una corriente. Los rápidos son una fuente de hábitat de alta calidad y fauna diversa, por lo tanto, una mayor frecuencia de ocurrencia mejora la diversidad de la comunidad del flujo.

b. SINUOSIDAD DEL CANAL: evalúa el meandro o la sinuosidad de la secuencia. La absorción de esta energía por las curvas protege la corriente de la erosión excesiva y las inundaciones y proporciona refugio para invertebrados bentónicos y peces durante las tormentas.

viii) ESTABILIDAD DE LA ORILLA (CONDICIÓN DE LA ORILLA): mide si las zonas de las orillas del río están erosionadas (o tienen el potencial de erosión). Los signos de erosión incluyen desmoronamiento, bancos sin vegetación, raíces expuestas de los árboles y suelo expuesto.

ix) PROTECCIÓN DE VEGETACIÓN EN LA ORILLA: evalúa la cantidad de protección generada por vegetación en la orilla y la porción cercana a la corriente de la zona ribereña. Esto es importante porque los sistemas de raíz de las plantas que crecen en las orillas del arroyo ayudan a mantener el suelo en su lugar, reduciendo así la



cantidad de erosión que es probable que ocurra. Este parámetro proporciona información sobre la capacidad de la orilla para resistir la erosión, así como alguna información adicional sobre la absorción de nutrientes por parte de las plantas, el control de la limpieza por arrastre y el sombreado de la corriente.

x) **ANCHO DE VEGETACIÓN DE LA ZONA RIPARIA:** mide el ancho de la vegetación natural desde el borde de la orilla del arroyo a través de la zona ribereña. La zona vegetativa sirve como amortiguador para los contaminantes que ingresan a una corriente, controlan la erosión y proporcionan el hábitat y la entrada de nutrientes en la corriente. Una zona ribereña relativamente intacta tiene un sistema de corriente robusto.

**2.5.2 El Índice Hidrogeomorfológico (IHG),** es una propuesta de evaluación española, basada en la premisa de que todos los impactos humanos sobre el sistema fluvial generan una respuesta en el funcionamiento hidrológico y geomorfológico del sistema. El índice consta de tres grupos de evaluación: (1) calidad funcional del sistema fluvial, (2) calidad del cauce y (3) calidad de las riberas. Sus parámetros se encuentran agrupados en: la naturalidad del régimen del caudal, disponibilidad y movilidad de sedimentos, y la funcionalidad de la llanura de inundación. Los parámetros se evalúan sobre una calificación de 10 puntos (Ollero *et al.*, 2007).

i) a. **NATURALIDAD DEL RÉGIMEN DE CAUDAL:** evalúa las modificaciones en el caudal natural del río/arroyo y sus causas, ya sean naturales o artificiales, el puntaje disminuye mientras mayor sean las alteraciones existentes que modifiquen el flujo.

b. **DISPONIBILIDAD Y MOVILIDAD DE SEDIMENTOS:** se mide la facilidad de la corriente en transportar los sedimentos a lo largo de su curso, disminuye la puntuación cuando se reporta la existencia de presas, aumento de especies vegetales que disminuyen el movimiento de los mismos y otras alteraciones antrópicas que se relacionen.

c. **FUNCIONALIDAD DE LA LLANURA DE INUNDACIÓN:** califica el estado de la llanura de inundación y su funcionalidad, disminuye la evaluación si hay barreras, obstáculos, canalización o cambio de uso de suelo que impida la disipación de energía de las aguas desbordadas y/o decantación de materiales finos.

ii) a. **NATURALIDAD DEL TRAZADO Y DE LA MORFOLOGÍA:** se evalúa el trazo del cauce natural de acuerdo con las características de la cuenca o el funcionamiento natural del sistema. El puntaje disminuye al existir cambios como desvíos o rellenos de cauces abandonados en el pasado y en el presente.

b. CONTINUIDAD Y NATURALIDAD DEL LECHO Y DE LOS PROCESOS LONGITUDINALES Y VERTICALES EN EL CAUCE: mide la existencia de infraestructuras transversales y longitudinales al río, que modifican la granulometría y morfometría de los materiales depositados. El puntaje disminuye con la existencia de presas (con 10 metros de altura), puentes y/o vados.

c. NATURALIDAD DE LAS MÁRGENES Y DE LA MOVILIDAD LATERAL: la movilidad del cauce es garantía de la dinámica fluvial activa y se relaciona con el funcionamiento ecológico y la biodiversidad. La existencia de canalización, defensas del margen o escombros disminuyen su funcionalidad.

iii) a. CONTINUIDAD LONGITUDINAL: cuando deja de ser continua la corriente, teniendo zonas de uso de suelo no recuperables, como urbanización, granjas o elementos estables, o infraestructuras lineales transversales, como vías de comunicación o puentes, disminuye el puntaje de este parámetro.

b. ANCHO, ESTRUCTURA Y NATURALIDAD: mide las modificaciones no naturales en el ancho del cauce (evidencia de disminución), estructura (existencia de presiones antrópicas como pastoreo, incendios, tala, explotación de acuíferos, residuos sólidos o uso recreativo) y naturalidad de la vegetación (alteración por invasiones o repoblaciones).

c. INTERCONECTIVIDAD TRANSVERSAL: si existe infraestructura lineales, longitudinales o diagonales como carreteras, caminos o senderos que rompan la interconectividad del corredor se penaliza en este parámetro.

**2.5.3** El Índice de Calidad Ecológica de Ríos Andinos (CERA) propuesto por Encalada y colaboradores (2011), es un protocolo que evalúa parámetros de calidad de agua, con el objetivo de tener seguimiento y conocer el estado de ríos de forma rápida, con participación de la comunidad. Esta evaluación se enfoca en ecosistemas de páramos, bosque andino de alta montaña y bosque andino de baja montaña (Sierra, 1999).

La unidad ecológica de evaluación es un tramo de río con una longitud de entre 50 y 100 metros, donde se valoran dos grupos de variables:

i) Características hidromorfológicas:

▪ Estructura y naturalidad de la vegetación de ribera: si la ribera presenta bosque, o vegetación se le califica como buena con 5 puntos, mientras que cultivos y pastos tienen una calificación de 0.

- Continuación de ribera: evalúa los parches existentes a lo largo del tramo que se evalúa, mientras más manchas aisladas peor será la calificación.
- Conectividad de la vegetación de ribera con otros elementos del paisaje adyacentes o próximos: se observa los paisajes que lo rodean, ya sea de plantaciones, potreros o elementos urbanos de baja calificación, mientras que estar próximos a páramos o bosques dan una calificación alta.
- Presencia de residuos sólidos y escombros: la cantidad de basura y escombros, así como la dificultad para extraerla evalúa este punto.
- Naturalidad del canal fluvial: se observan las modificaciones al cauce del río y su forma. Si el río no presenta modificaciones, canalizado, no tiene cemento ni estructuras sólidas se considera que es natural, obteniendo la puntuación más alta.
- Composición del sustrato: al existir mayor variedad de sedimentos y rocas mejor será la calificación.
- Regímenes de velocidad y profundidad del río: los ríos deben presentar los regímenes de velocidad (rápido-somero, rápido-profundo, lento-somero), mayor valor tendrá si presenta todos los regímenes.
- Elementos de heterogeneidad: evalúa los elementos que favorecen el aumento de biodiversidad de organismos acuáticos como son la hojarasca, troncos y ramas, rocas, diques naturales, raíces sumergidas, vegetación acuática sumergida (musgos, algas y plantas).

Cada uno de los parámetros tiene un puntaje máximo de 5 puntos, por tanto, si la puntuación del río va entre 0 y 10 la calidad hidromorfológica es pésima, de 10 a 20 el valor es mala; entre 20 y 28 la calidad es moderada; entre 28 y 35 será buena, y por último valores mayores a 35 es una calidad excelente.

ii) Los organismos que habitan en el agua, los macroinvertebrados bentónicos: donde los macroinvertebrados que son observados, se relacionan y se analiza su presencia con las condiciones de calidad del agua y del hábitat en el que se encontraron, es decir, con el conocimiento ya existente de los macroinvertebrados y las condiciones en donde pueden habitar se comparan con lo observado.

Al final, las dos evaluaciones se suman para obtener la calidad ecológica del río, y de esta forma conocer las posibles modificaciones generadas en el río, ya sea cambios morfológicos en la zona de ribera, cambios en la calidad del agua o la combinación de los dos factores.

**2.5.4** El *Hydromorphological Quality Index* (HYQI), por Ortiz en 2017, es una evaluación desarrollada y adaptada a partir de las dos propuestas descritas arriba como un Índice para los ríos de la Cuenca de México. El protocolo está basado en componentes fisicoquímicos e hidromorfológicos. Los componentes fisicoquímicos que se miden son:

- Físicos: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, y aforo.
- Químicos: pH, fósforo, nitritos, nitratos y amonio.
- Sustrato inorgánico: el porcentaje de rocas, cantos, gravas, arena y arcilla.
- Vegetación de ribera: Tipo de bosque y formas de vida dominante.

La evaluación hidromorfológica califica a cada parámetro con 10 puntos, dando una interpretación: óptima cuando se obtiene una puntuación de 120 a 85 puntos, media de 84 a 47 puntos, mala con puntuaciones de 46 a 13 puntos y pobre cuando es menor a 12 puntos. Además, está dividida en las siguientes secciones: (1) Cuenca, donde se evalúa la cobertura vegetal, el banco, el sustrato y desarrollo de actividades humanas que rodean la corriente, (2) Hidrología, en esta sección se califica la presencia de presas, los regímenes de velocidad y profundidad del cauce, alteraciones y estado del canal y, (3) las perturbaciones antropogénicas, que mide la presencia e impactos derivados de la actividad humana con efluentes directos a la corriente, desarrollo urbano, desarrollo humano y presencia de contaminación. Cada uno de estos puntos son explicados más adelante.

### 3. Justificación

El agua es esencial para cualquier ser vivo, y la calidad de la misma es vital para la salud de cualquier ecosistema, ya que de esa forma se garantiza no solo la provisión del líquido, si no todas las otras funciones que mantienen un ecosistema saludable.

Como se mencionó anteriormente, los manantiales son fuente importante en el consumo humano, a pesar de ello, la investigación y evaluación de los mismos no ha crecido lo suficiente como para conocer su hidromorfología, biodiversidad o los impactos que puedan afectar su salud ecosistémica, es decir, no se conoce un protocolo o índice que sea considerado como la base para la evaluación de calidad de manantiales.

A nivel internacional no se tienen protocolos que permitan la evaluación de los manantiales, como ejemplo los protocolos de evaluación de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y la Directiva Marco del Agua que se centran en la calificación de ríos y lagos, sin contemplar la evaluación del estado de manantiales.

En México, el tema de los manantiales (u ojos de agua, como también son llamados coloquialmente) también son poco estudiados si los comparamos con otros cuerpos de agua como ríos o lagos, tanto en diversidad biológica como en la caracterización física e hidromorfológica. Esto puede ser justificado por las características peculiares que estos poseen y las actividades antropogénicas que han llevado a la extinción total o parcial de los mismos (CONAGUA, 2015).

La Subcuenca del río Magdalena es un área clave en el abasto de agua superficial como una de las pocas fuentes locales de agua, en términos hidrológicos, es fundamental en la continuidad del ciclo del agua urbano, el mantenimiento del Suelo de Conservación y la biodiversidad dentro de la Ciudad de México. En ella aún existen manantiales que son utilizados como fuente primaria de consumo humano y ganadero y de uso para actividades de comercio, es por ello, que el conocer su calidad es esencial para la correcta toma de decisiones de su conservación y uso efectivo del líquido.

Por las razones anteriores, el presente trabajo pretende proporcionar un protocolo actualizado y revisado para la evaluación de calidad hidromorfológica de los manantiales de la Subcuenca del río Magdalena, disminuyendo la brecha existente en la evaluación de manantiales y las características hidromorfológicas, así como su importancia.

## 4. Objetivos

### **4.1. Objetivo general**

Evaluar el estado actual de conservación de los manantiales en la Subcuenca del Río Magdalena en función de parámetros fisicoquímicos, hidromorfológicos y biológicos para adecuar una propuesta de evaluación que permita estimar su grado de vulnerabilidad tomando en cuenta los usos y aprovechamientos locales.

### **4.2. Objetivos particulares**

- Determinar la integridad ecológica de los manantiales a partir de parámetros fisicoquímicos, hidromorfológicos y biológicos (macroalgas bentónicas) para proponerlos como indicadores en un protocolo de evaluación en la subcuenca.
- Documentar las actividades humanas de mayor frecuencia en los manantiales con importancia social local y que generan un impacto en la naturalidad de éstos, con el fin de clasificarlas como parámetros de perturbación.
- Proponer la adecuación de un protocolo de evaluación hidromorfológica en manantiales que incorpore los parámetros e indicadores que reflejen cambios derivados de las actividades humanas para estimar su naturalidad.

# 5. Metodología

## 5.1 Área de estudio

La Subcuenca del Río Magdalena se localiza en el suroeste del límite de la Ciudad de México, perteneciente a la Sierra de las Cruces y geográficamente se localiza entre los 19° 13' 00" y 19° 18' 00" norte y 99° 14' 00" y 99° 20' 00" oeste, con una elevación de 3650 msnm. Forma parte de la provincia morfotectónica de la Faja Volcánica Transmexicana, por lo que se conforma por cuerpos rocosos de lavas andesíticas y basálticas (Ferrusquía-Villafranca, 1998). Los suelos, de la misma forma, son de origen volcánico (Andosol húmico), muy permeables y susceptibles a erosionarse (Jujnovsky, 2006).

El gradiente altitudinal de la subcuenca conlleva a la existencia de dos tipos de clima, en la parte urbana y hasta los 3,050 msnm se presenta el clima templado subhúmedo y en la parte más alta entre los 3,100 a los 3,650 msnm el clima semifrío (García, 1988), con lluvias abundantes en los meses de junio a octubre y una época seca que va de noviembre a mayo (García, 2004). La temperatura media anual oscila entre los 10 y 14°C, con los meses más calientes en abril, mayo y junio (Almeda-Leñero *et al.*, 2007).

La vegetación es diversa de acuerdo con la altura y la topografía de la subcuenca, bosque de pino- *Pinus hartwegii* Lindl- en la parte alta de la subcuenca, bosque de oyamel -*Abies religiosa* (Kunth) Schldt, y Cham. - en la parte media y de bosque de encinos- *Quercus* spp. -y bosque mixto en la parte baja (Ávila-Akerberg, 2010).

En cuanto a la hidrología, el cauce principal es el Río Magdalena, el cual es alimentado por diversos manantiales como Cieneguillas, los Cuervos, San Miguel Ceresia, Temascalco, San José, Potrero Apapaxtla, las Ventanas y Pericos; los cuales le confieren la característica de ser un río perene (Jujnovsky, 2003). En la parte baja del río, al unir su curso con otros cauces que escurren desde las partes altas de las zonas montañosas, alimentan conjuntamente el cauce del Río Churubusco (Almeida-Leñero *et al.*, 2007).

En términos administrativos, la Subcuenca del Río Magdalena comprende las alcaldías Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa, las cuales son parte de las alcaldías con territorio con designación de Suelo de Conservación (SC) de la Ciudad de México. La mayor aportación al SC en términos de territorio lo hace la alcaldía Magdalena Contreras con un 76% de su territorio (INECC, 2007), siendo el resto de suelo urbano, zonas rurales y asentamientos irregulares. El Suelo de Conservación tiene

importancia por los servicios ecosistémicos que aporta a la sostenibilidad de la ciudad, como provisión de agua, almacén de carbono, herencia cultural, belleza escénica, calidad del agua, entre otros (Almeida-Leñero *et al.*, 2007). Todos los manantiales y arroyos que se describen en esta tesis se sitúan dentro del Suelo de Conservación de la subcuenca.

## **5.2 Localización de Manantiales**

La selección de los manantiales se basó principalmente en el conocimiento ecológico local a través de las referencias proporcionadas por los comuneros de la Comunidad Magdalena Atlitica (dueños de la tierra), que identificaron los cuerpos de agua con un buen estado de conservación, aguas limpias y fiables para utilización y consumo local. Con ello, se prosiguió a la geolocalización de los manantiales por parte del Laboratorio de Ecosistemas de Ribera guiados por el Señor Tomás, comunero que forma parte del Comité de Vigilancia dentro de la subcuenca. Algunos de los sitios ubicados ya eran conocidos como son los manantiales Cieneguillas, San José, los Cuervos, Temascalco, Potrero y la Bodega. En total se localizaron trece manantiales (Tabla 1), de los cuales ocho manantiales fueron factibles de monitoreo y, cinco, por presentarse dificultades de acceso, solo fue posible monitorear sus arroyos (Figura 3).



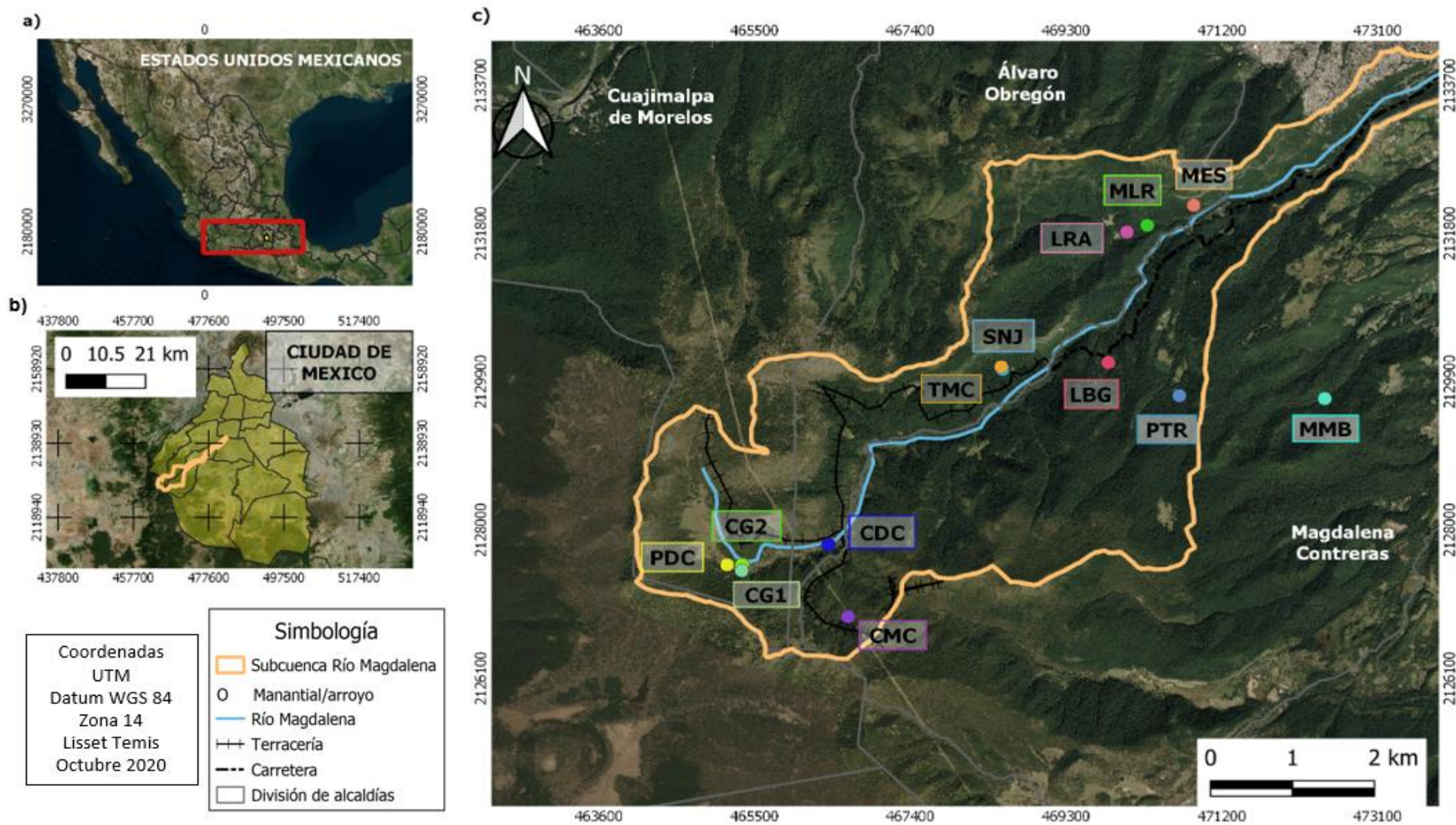


Figura 3. Localización geográfica de a) Ciudad de México, b) Subcuenca del Río Magdalena y c) Manantiales/arroyos muestreados. Fuente: INEGI, 2009.

**Tabla 1.** Ubicación geográfica y altitud de los manantiales y arroyos incluidos en el estudio de calidad hidrogeomorfológica.

| <b>Sitio</b>                         | <b>Acrónimo</b> | <b>Altitud (msnm)</b> | <b>Georreferenciación</b>        | <b>Cuerpo de agua</b> |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| <b>Manantial Ermita San José</b>     | MES             | 2882                  | N19°17'05.18''<br>O99°16'39.62'' | Manantial             |
| <b>Manantial La Rosita</b>           | MLR             | 2916                  | N19°16'56.83''<br>O99°16'59.03'' | Manantial             |
| <b>La Rosita Alto</b>                | LRA             | 2947                  | N19°16'53.98''<br>O99°17'07.55'' | Arroyo                |
| <b>La Bodega</b>                     | LBG             | 3072                  | N19°15'59.54''<br>O99°17'15.20'' | Manantial             |
| <b>Potrero</b>                       | PTR             | 3138                  | N19°15'45.82''<br>O99°16'45.51'' | Arroyo                |
| <b>San José</b>                      | SNJ             | 3221                  | N19°15'56.64''<br>O99°17'59.36'' | Manantial             |
| <b>Temascalco</b>                    | TMC             | 3236                  | N19°15'57.68''<br>O99°17'59.94'' | Manantial             |
| <b>Cañada de Cuervos</b>             | CDC             | 3446                  | N 19°14'43.5''<br>O99°19'12''    | Arroyo                |
| <b>Manantial Magdalena Barbechos</b> | MMB             | 3471                  | N19°15'44.7''<br>O99°15'44.7''   | Manantial             |
| <b>Cieneguillas 1</b>                | CG1             | 3528                  | N19°14'35.1''<br>O99°19'48.1''   | Manantial             |
| <b>Cieneguillas 2</b>                | CG2             | 3524                  | N19°14'32.6''<br>O99°19'48.2''   | Manantial             |
| <b>Presa Cieneguillas</b>            | PDC             | 3530                  | N19°14'35''<br>O99°19'54.4''     | Arroyo                |
| <b>Cañada de Manantial Cuervos</b>   | CMC             | 3602                  | N 19°14'13.5''<br>O99°19'3.8''   | Arroyo                |

### 5.3 Trabajo de campo

Se realizaron tres muestreos para su monitoreo dentro de las fechas 12-13 de junio, 4-5 de septiembre de 2019 y 23-24 de enero de 2020. A continuación, se muestra de forma resumida el trabajo realizado en campo y en laboratorio (Figura 4).

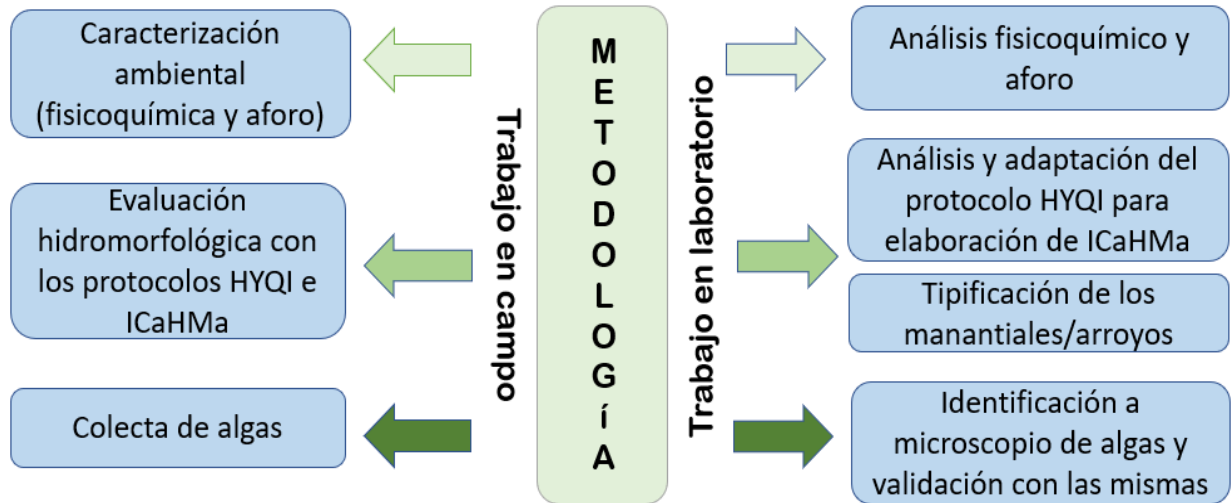


Figura 4. Metodología del trabajo.

- Caracterización ambiental realizada *in situ*.

Se utilizó una sonda multiparamétrica (YSI 6600), con la cual se tomaron medidas *in situ* de temperatura ( $T^{\circ}\text{C}$ ), conductividad específica ( $\kappa_{25}$ ), pH, saturación de oxígeno (SO) y oxígeno disuelto (OD). También, se tomaron datos de profundidad (P) y velocidad de corriente (VC) con un correntómetro con molinete, para posteriormente calcular la descarga (Q) de acuerdo a la propuesta de Gore (2007).

De la misma forma, se tomaron dos muestras de 1 litro de agua por cada uno de los manantiales/arroyos en frascos de polipropileno, lavados y esterilizados (APHA, 2012). La toma de muestra se realizó de manera preferente y lo más posible cercana a la zona donde emerge el agua de los manantiales o de los principales arroyos generados, esto con el fin de obtener datos más representativos de los cuerpos de agua. Al finalizar, las muestras fueron refrigeradas a  $4^{\circ}\text{C}$  y transportadas al laboratorio para analizar la concentración de los siguientes nutrientes: nitrógeno, fósforo y sulfatos dentro de las 24 horas subsecuentes a la colecta.

- Evaluación hidromorfológica.

En los dos primeros muestreos, se evaluó la calidad hidrogeomorfológica utilizando el *Hydromorphological Quality Index* (HYQI) propuesto por Ortiz (2017). Al ser este protocolo una modificación específica para los ríos de la Cuenca de México, se decidió que sería la base para realizar las adecuaciones propias que permitieran acoplar una evaluación a los manantiales. En el tercer y último muestreo<sup>1</sup> se utilizó el protocolo piloto desarrollado en esta investigación (ICaHMa), el cual ya incorporaba algunas adecuaciones, esto con la finalidad de hacer un piloto para probar la eficacia del protocolo en la evaluación el estado de calidad hidromorfológica de los manantiales. Todos los muestreos fueron supervisados por académicos con experiencia en el tema.

- Indicadores biológicos.

Como medida de validación de la calidad hidromorfológica, se usaron las algas macroscópicas como bioindicadores. Se registro en cada sitio la cobertura algal (%) usando la técnica del cuadrante (Necchi *et al.*, 1995), es decir, en un área en forma de cuadro, generalmente de 1m x 1m, se obtiene la cantidad porcentual de la cobertura algal. Adicionalmente, se tomaron registros de parámetros microambientales en los crecimientos colectados que influyen en el crecimiento de las algas como: profundidad del crecimiento, el tipo de sustrato y la velocidad de corriente (VC). Tanto de la profundidad como de la velocidad se tomaron cinco repeticiones que fueron promediadas por cuadrante. Posterior a ello, se tomó una muestra de las algas macroscópicas identificadas, las cuales fueron almacenadas en frascos de polipropileno junto con agua de río en los cuales fueron transportados en refrigeración al laboratorio para su posterior revisión al microscopio e identificación.

#### **5.4 Trabajo en laboratorio**

- Análisis fisicoquímico y aforo.

A partir de los datos registrados en los tres muestreos con la sonda multiparamétrica y el correntómetro, se obtuvieron promedios, datos máximos y mínimos de cada sitio para cada parámetro, tanto para datos fisicoquímicos y el aforo. Es importante mencionar que por poca cantidad de datos que se tuvieron por sitio no fue posible realizar análisis estadísticos mayores a los antes mencionados.

---

<sup>1</sup> En el diseño original dos colectas posteriores a la adecuación del protocolo fueron planeadas, la última colecta se realizó en enero de 2020 y una cuarta colecta no fue posible debido a la emergencia sanitaria por COVID-19.

Las muestras de agua colectadas fueron analizadas por duplicado en el laboratorio de Ecosistemas de Ribera de la UNAM mediante la técnica de espectrofotometría para detectar las concentraciones en agua de fosforo reactivo soluble ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) para lo que se utilizó un espectrofotómetro Hach DR/39000 con kits de reacción de la misma marca.

Posterior a ello, los resultados se compararon con los límites establecidos en nuestro país de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los “Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua y bienes nacionales”, y NOM-127-SSA1-1994, que establece “La salud ambiental, agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, con la finalidad de evaluar la carga de nutrientes y si ésta se encontraba dentro de los límites máximos recomendados.

- Adaptación del protocolo.

De acuerdo con las observaciones realizadas en los dos primeros muestreos con el protocolo base *-Hydromorphology Quality Index* por Ortiz (2017)- y los protocolos de referencia -Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), Índice Hidromorfológico por Ollero *et al.*, 2007 y el Índice de Calidad Ecológica de los Ríos Alto-Andinos (Encalada *et al.*, 2011)-, se hizo un análisis en conjunto con expertos del Laboratorio de Ecosistemas de Ribera y Socio-ecosistemas de los parámetros que proporcionaban información relevante en la evaluación hidromorfológica de manantiales. Posterior a ello, con la información necesaria, se añadieron parámetros faltantes al protocolo piloto (ICaHMa) justificando la importancia de los mismos con base en la literatura y en las observaciones de campo; por último, se obtuvo la versión final y se adecuaron las calificaciones para cada sección del protocolo de manantiales. Como ya se mencionó, este protocolo se puso a prueba en el último muestreo y se posteriormente se realizaron los cambios necesarios para su funcionalidad.

- Tipificación de los manantiales.

Cada uno de los sitios fue descrito de acuerdo con sus características principales, tipo de manantial, la accesibilidad, la vegetación circundante y las perturbaciones de origen antropogénico que fueron identificadas. Se registraron las puntuaciones de las diferentes secciones evaluadas y finalmente se obtuvo una calificación por cada uno de los protocolos para posteriormente hacer comparaciones entre ellos.

- Identificación de las algas macroscópicas.

Se realizó la identificación a nivel especie de las algas macroscópicas utilizando un microscopio óptico Olympus BX52 (Tokio, Japón) y literatura especializada sobre taxonomía de algas: Huber-Pestalozzi *et al.* (1983); Komárek (2008); Komárek y Plinski (2007); Jnkovská y Komárek (2001), así como literatura especializada en el área de estudio como el libro Diversidad e indicadores ecológicos en ríos de la Cuenca de México (Carmona *et al.*, 2019). Todas las muestras colectadas fueron identificadas a la mayor resolución taxonómica posible, que en la mayoría de los casos fue de especie y en unos pocos a género. Posterior a ello, las muestras se preservaron en formol al 4% para ser almacenadas en la colección ficológica de la Facultad de Ciencias, UNAM.

- Análisis de los resultados

Teniendo todos los resultados, se analizaron en conjunto, es decir, se relacionaron los resultados de los parámetros fisicoquímicos, el resultado de los tres muestreos de la evaluación hidromorfológica y el registro de algas para conocer de manera integral la calidad ecológica de los manantiales.

## 6. Resultados

### 6.1 *Caracterización ambiental.*

Los trece manantiales/arroyos estudiados presentaron resultados de parámetros fisicoquímicos similares, siendo unos pocos los sitios que salen de la generalidad. La temperatura del agua mostró estar en un intervalo entre fría y templada (entre 11 a 12°C), la saturación de oxígeno, en la mayoría de los casos fue superior al 90%, mostrando tener altos niveles de oxigenación, la cantidad de sólidos disueltos totales mostró tener un máximo de 58 mg/L, la conductividad específica tuvo valores promedios entre los 60 y 110  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el pH mostró que son manantiales con agua cercana a la neutralidad (Tabla 2).

En términos físicos, parámetros como el ancho del cauce evidenció que los manantiales muestreados son pequeños (Tabla 3), siendo predominantemente menores a un metro de ancho, con profundidades menores a 8 cm, velocidades de corriente bajas, y consecuentemente valores de caudales muy bajos (0.001-0.025m<sup>3</sup>/s).

En cuanto a la concentración de nutrientes registrada en los manantiales, comparados con los límites máximos permisibles (LMP) establecidos para la Protección de la vida acuática, NOM-001-SEMARNAT-1996, y Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, NOM-127-SSA1-1994, la cantidad de fosfato se encontró muy por debajo de lo establecido en las dos normas, sin superar los 0.04 mg/L, lo mismo sucedió con el nitrógeno inorgánico disuelto, que no sobrepasó ninguno de los dos límites propuestos por las normas oficiales, estando alrededor de los 0.02 mg/L y, por último, la cantidad de sulfatos varió entre los sitios con intervalos que oscilaron entre los 11 y 1 mg/L, sin superar los LMP de la NOM-127-SSA1-1994, la cual es la única que regula este parámetro.

En la evaluación de nutrientes se determinó que los sitios con mayores concentraciones fueron el MES, CG1 y CG2. Sin embargo, ningún manantial/arroyo superó lo establecido en las dos normas oficiales consultadas (Figura 5).

**Tabla 2.** Valores de los parámetros fisicoquímicos registrados en los manantiales y arroyos evaluados. Se presentan los datos promedio (X), mínimo (MIN) y máximo (MAX) para temperatura (T), sólidos disueltos totales (SDT), pH, oxígeno disuelto (OD) y saturación de oxígeno (SO); para estos dos últimos parámetros no se realizó min y máx. porque sólo se monitorearon durante un muestreo.

| SITIO                                | ACR | T [°C]      |      |      | SDT [mg/L]  |      |      | K25 [µS/cm]  |       |       | pH         |     |     | OD [mg/L]  | SO [%]       |
|--------------------------------------|-----|-------------|------|------|-------------|------|------|--------------|-------|-------|------------|-----|-----|------------|--------------|
|                                      |     | X           | MIN  | MAX  | X           | MIN  | MAX  | X            | MIN   | MAX   | X          | MIN | MAX | X          | X            |
| <b>Manantial Ermita San José</b>     | MES | <b>11.9</b> | 10.8 | 12.8 | <b>59.0</b> | 58.0 | 60.0 | <b>117.5</b> | 116.0 | 119.0 | <b>6.9</b> | 6.7 | 7.1 | <b>7.1</b> | <b>95.5</b>  |
| <b>Manantial La Rosita</b>           | MLR | <b>11.6</b> | 10.4 | 12.3 | <b>58.0</b> | 57.0 | 59.0 | <b>112.5</b> | 112.0 | 113.0 | <b>6.9</b> | 6.6 | 7.1 | <b>7.1</b> | <b>96.4</b>  |
| <b>La Rosita Alto</b>                | LRA | <b>11.3</b> | 10.1 | 12.1 | <b>52.5</b> | 52.0 | 53.0 | <b>128.5</b> | 103.0 | 154.0 | <b>6.3</b> | 5.5 | 6.8 | <b>7.5</b> | <b>100.0</b> |
| <b>Potrero</b>                       | PTR | <b>10.6</b> | 10.4 | 10.8 | <b>39.0</b> | 39.0 | 39.0 | <b>78.5</b>  | 78.0  | 79.0  | <b>6.2</b> | 5.7 | 6.5 | <b>7.1</b> | <b>96.0</b>  |
| <b>La Bodega</b>                     | LBG | <b>12.2</b> | 12.0 | 12.3 | <b>37.0</b> | 34.0 | 40.0 | <b>68.5</b>  | 30.0  | 107.0 | <b>6.0</b> | 5.3 | 6.5 | <b>7.6</b> | <b>100.0</b> |
| <b>San José</b>                      | SNJ | <b>10.9</b> | 10.9 | 11.0 | <b>41.6</b> | 35.2 | 48.0 | <b>97.5</b>  | 97.0  | 98.0  | <b>6.5</b> | 5.7 | 7.0 | <b>6.5</b> | <b>88.0</b>  |
| <b>Temascalco</b>                    | TMC | <b>11.0</b> | 10.9 | 11.2 | <b>49.1</b> | 48.0 | 50.2 | <b>95.5</b>  | 94.0  | 97.0  | <b>6.4</b> | 6.0 | 7.3 | <b>6.8</b> | <b>91.0</b>  |
| <b>Manantial Magdalena Barbechos</b> | MMB | <b>9.4</b>  | 9.0  | 10.0 | <b>28.6</b> | 28.3 | 29.0 | <b>58.9</b>  | 57.8  | 60.0  | <b>6.7</b> | 6.3 | 7.4 | <b>7.5</b> | <b>101.3</b> |
| <b>Cañada de Cuervos</b>             | CDC | <b>12.3</b> | 11.0 | 13.7 | <b>34.0</b> | 30.0 | 38.0 | <b>72.5</b>  | 69.0  | 76.0  | <b>6.5</b> | 6.0 | 7.1 | <b>6.6</b> | <b>98.5</b>  |
| <b>Cañada de Manantial Cuervos</b>   | CMC | <b>11.7</b> | 9.7  | 15.6 | <b>27.5</b> | 22.0 | 33.0 | <b>65.0</b>  | 65.0  | 65.0  | <b>5.7</b> | 5.4 | 6.0 | <b>5.3</b> | <b>90.0</b>  |
| <b>Cieneguillas 1</b>                | CG1 | <b>9.9</b>  | 9.9  | 10.0 | <b>35.5</b> | 35.0 | 36.0 | <b>69.5</b>  | 68.0  | 71.0  | <b>6.8</b> | 6.2 | 7.7 | <b>5.5</b> | <b>75.5</b>  |
| <b>Cieneguillas 2</b>                | CG2 | <b>10.0</b> | 10.0 | 10.0 | <b>26.5</b> | 16.0 | 37.0 | <b>72.0</b>  | 70.0  | 74.0  | <b>6.4</b> | 5.9 | 7.1 | <b>6.5</b> | <b>90.0</b>  |
| <b>Presa Cieneguillas</b>            | PDC | <b>10.9</b> | 9.9  | 12.9 | <b>34.5</b> | 30.0 | 39.0 | <b>68.0</b>  | 58.0  | 78.0  | <b>6.5</b> | 5.8 | 7.5 | <b>6.7</b> | <b>97.4</b>  |



**Tabla 3.** Resultados de promedio (X), mínimo (MIN) y máximo (MAX) de los parámetros físicos evaluados: Ancho, velocidad de corriente (VC), profundidad (P) y Caudal (Q).

| SITIO                                | ACRÓNIMO | ANCHO [m]   |      |      | VC [m/s]     |       |       | P [m]        |       |       | Q [m <sup>3</sup> /s] |        |        |
|--------------------------------------|----------|-------------|------|------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|-----------------------|--------|--------|
|                                      |          | X           | MIN  | MAX  | X            | MIN   | MAX   | X            | MIN   | MAX   | X                     | MIN    | MAX    |
| <b>Manantial Ermita San José</b>     | MES      | <b>0.37</b> | 0.20 | 0.50 | <b>0.100</b> | 0.100 | 0.100 | <b>0.018</b> | 0.013 | 0.025 | <b>0.0007</b>         | 0.0003 | 0.0010 |
| <b>Manantial La Rosita</b>           | MLR      | <b>0.48</b> | 0.30 | 0.60 | <b>0.223</b> | 0.150 | 0.318 | <b>0.032</b> | 0.025 | 0.040 | <b>0.0031</b>         | 0.0020 | 0.0038 |
| <b>La Rosita Alto</b>                | LRA      | <b>1.80</b> | 1.40 | 2.20 | <b>0.249</b> | 0.171 | 0.310 | <b>0.073</b> | 0.051 | 0.110 | <b>0.0211</b>         | 0.0000 | 0.0411 |
| <b>Potrero</b>                       | PTR      | <b>0.62</b> | 0.16 | 1.10 | <b>0.987</b> | 0.230 | 1.770 | <b>0.041</b> | 0.025 | 0.065 | <b>0.0136</b>         | 0.0081 | 0.0184 |
| <b>La Bodega</b>                     | LBG      | <b>0.42</b> | 0.35 | 0.50 | <b>0.163</b> | 0.100 | 0.200 | <b>0.021</b> | 0.013 | 0.034 | <b>0.0012</b>         | 0.0010 | 0.0014 |
| <b>San José</b>                      | SNJ      | <b>0.77</b> | 0.60 | 1.00 | <b>0.333</b> | 0.149 | 0.590 | <b>0.067</b> | 0.063 | 0.073 | <b>0.0190</b>         | 0.0066 | 0.0389 |
| <b>Temascalco</b>                    | TMC      | <b>0.82</b> | 0.45 | 1.20 | <b>0.305</b> | 0.224 | 0.370 | <b>0.061</b> | 0.023 | 0.090 | <b>0.0156</b>         | 0.0037 | 0.0269 |
| <b>Manantial Magdalena Barbechos</b> | MMB      | <b>1.10</b> | 1.00 | 1.20 | <b>0.345</b> | 0.280 | 0.444 | <b>0.041</b> | 0.030 | 0.048 | <b>0.0153</b>         | 0.0102 | 0.0195 |
| <b>Cañada de Cuervos</b>             | CDC      | <b>0.80</b> | 0.50 | 1.40 | <b>0.232</b> | 0.160 | 0.307 | <b>0.067</b> | 0.050 | 0.096 | <b>0.0144</b>         | 0.0040 | 0.0306 |
| <b>Cañada de Manantial Cuervos</b>   | CMC      | <b>0.47</b> | 0.00 | 0.90 | <b>0.122</b> | 0.000 | 0.196 | <b>0.013</b> | 0.000 | 0.028 | <b>0.0019</b>         | 0.0000 | 0.0049 |
| <b>Cieneguillas 1</b>                | CG1      | <b>0.70</b> | 0.50 | 1.00 | <b>0.146</b> | 0.110 | 0.167 | <b>0.036</b> | 0.020 | 0.063 | <b>0.0033</b>         | 0.0019 | 0.0053 |
| <b>Cieneguillas 2</b>                | CG2      | <b>0.50</b> | 0.30 | 0.70 | <b>0.241</b> | 0.163 | 0.370 | <b>0.024</b> | 0.012 | 0.040 | <b>0.0033</b>         | 0.0010 | 0.0074 |
| <b>Presa Cieneguillas</b>            | PDC      | <b>0.73</b> | 0.00 | 1.20 | <b>0.186</b> | 0.000 | 0.368 | <b>0.080</b> | 0.000 | 0.160 | <b>0.0256</b>         | 0.0000 | 0.0589 |



**Figura 5.** Concentración de nutrientes en los manantiales estudiados. El eje “y derecho” marca la escala del Límite Máximo Permissible correspondiente (LMP) a las normas mexicanas NOM-127-SSA1-1994 y NOM-001-SEMARNAT-1996, mientras que el eje “y izquierdo” muestra la concentración de nutrientes registrada en las muestras. Los sitios de muestreo Manantial Ermita San José (MES), Manantial La Rosita (MLR), La Rosa Alto (LRA), Potrero (PTR), La Bodega (LBG), San José (SNJ), Temascalco (TMC), Manantial Magdalena Barchechos (MMB), Cañada de Cuervos (CDC), Cañada de Manantial Cuervos (CMC), Cieneguillas 1 (CG1), Cieneguillas 2 (CG2) y Presa Cieneguillas (PDC).

## 6.2 Análisis y adaptación del protocolo HYQI

Como primer punto para la adaptación de un protocolo para manantiales, se evaluaron los parámetros del protocolo HYQI, de forma que fuera un punto de partida para adecuar la evaluación de manantiales (Tabla 4).

**Tabla 4** Descripción de los parámetros evaluados de calidad hidromorfológica del protocolo HYQI (Ortiz, 2017): análisis y adaptación en los manantiales y la evaluación final de cada uno de ellos: se mantiene; se mantiene con modificaciones, se elimina o se reemplaza.

| Parámetro de HYQI                      | Análisis y adaptaciones respecto a la calidad de los manantiales  |
|--|---|
| <b>I. Cuenca</b>                       | <b>I. CALIDAD DEL HÁBITAT RIPARIA</b>   |
| <b>1. Cobertura vegetal nativa</b>     | De acuerdo a la definición de Integridad Ecológica, parte de la salud de un ecosistema está conformado por la sucesión primaria y biodiversidad que lo compone (Vélez y Gómez, 2008), lo que se ve reflejado en la vegetación que rodea al cuerpo de agua. Mientras menor sea la cantidad de vegetación introducida, mayor será la naturalidad y, por lo tanto, se asume que presenta menores modificaciones o intervenciones antropogénicas, relacionadas principalmente con el cambio de uso de suelo. Por lo que este punto sí hace referencia a la calidad hidromorfológica de manantiales.<br><b>Evaluación final: Se mantiene</b>   |
| <b>2. Estabilidad de las orillas</b>   | El nivel de la orilla, está determinado por las aportaciones pluviales y de agua subterránea, a este último se le denomina caudal base, lo que permite, en muchos casos, la existencia de un caudal durante todo el año en los ríos o cuerpos de agua (Távora-Espinoza y Sanz, 2010). Por lo que, la estabilidad del caudal base, permite evaluar si la cantidad de agua del acuífero es modificada. Para este punto, es importante realizar observaciones a lo largo del año, con el objetivo de conocer el flujo en diferentes épocas del mismo, particularmente, para poder tener un referente durante la temporada de estiaje que es cuando se esperan los flujos mínimos. La cantidad de sustrato que podemos observar expuesto en el canal o piscina* de manantial indica una disminución de agua que, dependiendo del flujo, es causado por extracción o por presencia de presas que retienen el agua (Barbour <i>et al.</i> , 1999). Por lo que este punto sí hace referencia a la calidad hidromorfológica de manantiales, solo se cambiará el nombre a <i>Estabilidad del flujo base</i> .<br><b>Evaluación final: Se mantiene con modificaciones</b> |
| <b>3. Características del sustrato</b> | El Índice original, hace referencia a la diversidad de sustrato en el lecho del río, mientras mayor diversidad mayor calidad ecológica tendrá, ya que se relaciona con la heterogeneidad del hábitat y por lo tanto la disponibilidad de nichos que puede colonizar la biota. A diferencia de esto, para los manantiales la diversidad del sustrato no explica lo mismo, es por ello, que este parámetro se modifica a <i>Perturbación del sustrato</i> , donde se califica de manera porcentual la perturbación en el sustrato que se observe en la piscina o arroyo que genere el manantial, lo que indicará la existencia de remoción, excavaciones o diferencia de sustrato original.<br><b>Evaluación final: Se mantiene con modificaciones</b>  |

|   |   |
|---|---|
| <p><b>4. Desarrollo de ganadería y agricultura en la zona de ribera</b></p> | <p>La presencia de actividad primaria cercana a los cuerpos de agua, puede significar contaminación <i>in situ</i> en la zona de recarga del acuífero. Entre mayor sea el área y cercanía de la actividad primaria (10 metros de diámetro), mayor será la exposición a contaminantes. Este punto se enfoca principalmente a contaminación por fertilizantes, aguas negras o excretas de animales de ganado. Por lo que este punto sí hace referencia a la calidad hidromorfológica de manantiales.</p> <p><b>Evaluación final: Se mantiene</b></p>  |
| <p><b>II. Hidrología</b></p>  | <p><b>II. HIDROLOGÍA</b></p>  |
| <p><b>5. Presencia de presas</b></p>  | <p>La presencia de presas, ya sea aguas abajo o aguas arriba, genera cambios en la cantidad y calidad del agua al interrumpir el flujo natural, además, aumenta o disminuye la infiltración de agua en las zonas de recarga, y crean un impacto en el ecosistema, influyendo en la diversidad y abundancia de organismos que habitan el cuerpo de agua. Es por ello, que a diferencia del índice original a este punto se le agrega la presencia de presas aguas arriba y se modifica su calificación en función del tipo de presa y la cantidad del flujo de agua que permite pasar.</p> <p><b>Evaluación final: Se mantiene con modificaciones</b></p>  |
| <p><b>6. Regímenes de velocidad/ profundidad.</b></p>                       | <p>En el índice original, este punto califica la presencia de los cuatro regímenes de velocidad para ríos, sin embargo, para manantiales este parámetro no determina sustancialmente la calidad hidromorfológica, ya que, la cantidad de agua que emane del manantial está determinado principalmente por el acuífero, es decir, del tipo y caracterización del manantial. Puede que la cantidad del agua emanada sea modificada por causas antropogénicas (las cuales ya se califican en otros puntos) pero el conocer el régimen de velocidad <i>per se</i> no hace referencia a la calidad del mismo.</p> <p><b>Evaluación final: Se elimina</b></p>   |
| <p><b>7. Alteración en el canal</b></p>                                     | <p>Este aspecto de la evaluación se basa principalmente en la existencia o no de canalización del cauce mediante el uso de cualquier material como madera, cemento, plásticos, etcétera. Cuando existe canalización cercana a un manantial la Integridad Ecológica se ve modificada al cambiar la forma del ecosistema, así como la dirección de corriente, cambiando la calidad y la cantidad del agua, por lo que sí se utiliza este parámetro.</p> <p><b>Evaluación final: Se mantiene</b></p>   |
| <p><b>8. Estado del canal</b></p>   | <p>En el índice original, hace referencia al porcentaje de agua que alcanza la base de ambas orillas y el sustrato que se encuentra expuesto dentro de los ríos. En el caso de los manantiales se referiría a la cantidad de sustrato expuesto en piscinas* o los arroyos que genera, lo cual ya se califica en el punto 3, por lo que este punto se elimina.</p> <p>Se observó en campo que era necesario adicionar un aspecto que calificara la “<i>Presencia de tuberías artesanales</i>”, que como se explica en el anterior punto, la existencia de tuberías modifica el flujo y el ecosistema en sí. En zonas rurales es común que la accesibilidad a agua limpia sea nula, por lo que para consumo se crean tuberías artesanales; estas tuberías son sistemas de distribución local que ayudan a desviar la corriente con la ayuda de mangueras de diferente grosor para su posterior distribución y/o almacenaje.</p> <p><b>Evaluación final: Se modifica completamente</b></p> |

| III. Perturbaciones antropogénicas   | III. PERTURBACIONES ANTROPOGÉNICAS   |
|--|--|
| <p><b>9. Efluentes directos al río por el uso doméstico</b></p>              | <p>Los efluentes directos de origen humano en los cuerpos de agua, indican dos cosas, 1. que el manantial/arroyo se localiza en una zona de fácil acceso, y 2. que podría estar expuesto a contaminación derivada de actividades como el uso doméstico y/o restaurantes. Por lo tanto, podríamos esperar un incremento en bacterias de origen fecal e incremento en nutrientes. Por lo que este punto sí hace referencia a la calidad hidromorfológica de manantiales.<br/> <b>Evaluación final: Se mantiene</b></p>   |
| <p><b>10. Desarrollo urbano</b></p>  | <p>La localización de un cuerpo de agua en zonas de fácil acceso y cercano a zonas para transitar como caminos, senderos, carreteras, terracería, casas o en general a asentamientos humanos, puede incrementar la vulnerabilidad del manantial a ser contaminado por residuos sólidos, líquidos o materia orgánica, como también una mayor susceptibilidad para la explotación y aprovechamiento local. Por lo que este punto sí hace referencia a la calidad hidromorfológica de manantiales.<br/> <b>Evaluación final: Se mantiene</b></p>  |
| <p><b>11. Desarrollo humano</b></p>  | <p>Este punto hace referencia a la cantidad de actividades humanas alrededor del cuerpo de agua (diámetro de 10 metros), como agricultura, ganadería, doméstica, etcétera. A diferencia del punto 4 y el punto 10, este parámetro contabiliza todas las actividades humanas que puedan contaminar al cuerpo de agua, no sólo a la ganadería y agricultura, o los caminos cercanos al manantial/arroyo. Por lo que este punto sí hace referencia a la calidad hidromorfológica de manantiales.<br/> <b>Evaluación final: Se mantiene</b></p>  |
| <p><b>12. Presencia de contaminación orgánica, de basura y escombros</b></p> | <p>En el protocolo original, el parámetro conjunta todo tipo de residuos y desechos para hacer una evaluación de ello. Sin embargo, es importante separar los desechos orgánicos generados de la misma vegetación de alrededor del cuerpo de agua como hojarasca, de aquellos desechos orgánicos que no son originarios del sitio, como desperdicios de alimentos o cadáveres de animales no originarios del ecosistema, y residuos inorgánica como plásticos, escombros o material ajeno al ecosistema natural. Es por eso que se decide hacer una separación del punto a <b>Presencia de desechos orgánicos</b> y otro punto <b>Presencia de desechos inorgánicos</b>, los dos puntos de acuerdo a un área de 10 metros alrededor del cuerpo de agua.<br/> <b>Evaluación final: Se mantiene con modificaciones</b></p> |
| <p><b>13. Presencia de protección alrededor (Propuesta a agregar)</b></p>    | <p>Existen dos enfoques generales para la protección de aguas subterráneas y de manantiales, para lo que se utilizan los términos "recurso", que se refiere al agua subterránea completa, y "fuente", referido al punto de aprovechamiento como un manantial, un pozo de bombeo o una zona de extracción de agua (Daly et al., 2002). El área determinada para hacer las observaciones sobre cualquier cuerpo de agua es de 10 metros de diámetro (USEPA y DELGEPAGSI, 1999; DVGW, 2006; SAEFFL,2004). Esta zona, enfocada a manantiales y pozos, también es llamada "Zona de protección del pozo" y comprende el área que rodea inmediatamente al pozo o manantial de cualquier impacto directo como la contaminación, generalmente se extiende de 10 a 20</p>  |

|  |  |
|--|--|
|  | metros alrededor y puede estar o no delimitado. En esta zona está prohibida alguna actividad que no se relacione con la extracción del agua (Kresic y Stevanovic, 2010). Es por ello que, en este punto se califica la presencia de protección o delimitación como enrejado, cubierto por concreto, facilidad de acceso, etcétera.<br><b>Evaluación final: Se agrega</b>   |
| <b>Evaluación</b>  | <b>Evaluación</b>  |
| <b>Óptima 120-85</b><br><b>Media 84-47</b><br><b>Mala 46-13</b><br><b>Pobre &lt;12</b> | El formato final de evaluación del protocolo es dividido en cuatro calificaciones, con máximo 120 puntos para los ríos con mejor calidad y menor a 12 puntos calificando como calidad deficiente. Para el protocolo de manantiales, también se optó por utilizar cuatro clasificaciones, ya que las diferencias entre los niveles de calidad no son tan marcadas. Por tanto, y guiados por la interpretación de evaluación de la DMA, la máxima calificación es de 130 puntos hasta 110 puntos (óptima), de 109 a 80 puntos (media), de 79 a 50 puntos (mala) y menor o igual a 49 puntos es determinada como deficiente.<br><b>Evaluación final: Se mantiene con modificaciones</b> |

\* Piscina de manantial hace referencia al cuerpo de agua generado por un manantial de tal forma que el agua se estanca en la misma área que emerge. También es llamado ojo de agua.

### 6.3 Protocolo piloto (ICaHMa).

A continuación, se muestra el Protocolo piloto “Índice de Calidad Hidrogeomorfológico para manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena” (ICaHMa) con ilustraciones de los sitios evaluados. Este protocolo incluye todas las modificaciones mencionadas en la sección anterior, está dividido en tres secciones: Calidad del hábitat ripario, Hidrología, y perturbaciones antropogénicas, y cuenta con trece parámetros en total a evaluar.

#### I. CALIDAD DEL HÁBITAT RIPARIO




##### 1. Cobertura vegetal (Nativa)

|  |                                    |                                     |   |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| > 70% de la cobertura vegetal de especies nativas. | 60-40% de cobertura vegetal nativa | 50-30% de cobertura vegetal nativa. | < 30% de la superficie de cobertura vegetal nativa, parches aislados. |
|  |                                    |                                     |   |

## 2. Estabilidad del flujo base

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| <10% del sustrato expuesto.   | Entre el 20-40% del sustrato expuesto.  | Entre el 50- 80% del sustrato expuesto.  | >80% del sustrato expuesto.   |
|  |  |  |  |

## 3. Perturbación en el sustrato

|  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| <10% del sustrato perturbado   | Entre el 20-40% de sustrato perturbado.  | Entre 50-80% de sustrato perturbado.  | >80% del sustrato perturbado.  |
|  |  |  |  |

## 4. Desarrollo de ganadería y agricultura

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
| Sin presencia de cultivos o zonas ganadera, sin derivaciones para agricultura o ganadería. | 20% del suelo para uso agrícola y/o ganadero.                                       | 50% del suelo para uso agrícola y/o ganadero.  | >80% del suelo para uso agrícola y/o ganadero, presencia de derivaciones para uso doméstico. |
|         |  |  |         |

## II. HIDROLOGÍA



### 5. Presencia de presas

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| Ausencia de presas  | Presencia de presa con material que permite pasar <50% flujo de agua.             | Presencia de presa con material que permite pasar <20% de flujo de agua.           | Presencia de presa con material que no permite el paso del flujo.                   |
|  |  |  |  |

### 6. Alteración del canal

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| Ausencia de canalización  | Evidencia de canalización en el pasado en menos del 40% del escurrimiento.          | Canalización extensiva, 40-80% del escurrimiento canalizado e interrumpido.          | Banco de ribera con cemento o gavión, en 80% de escurrimiento canalizado.             |
|  |  |  |  |



### 7. Presencia de tuberías artesanales

|   |  |
|---|--|
| Ausencia  | Presencia  |
|  |  |



### III. PERTURBACIONES ANTROPOGÉNICAS.

#### 8. Efluentes directos al río o manantial por el uso doméstico

| Ausencia  | Presencia  |
|---|--|
|  |  |

#### 9. Desarrollo urbano

|  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| Ausencia de asentamientos humanos, carreteras, senderos para uso doméstico.        | 20% del suelo con presencia de senderos y/o casas de madera o aisladas.            | 50% del suelo con infraestructura como casas de concreto, carreteras.               | >80% del suelo con infraestructura como casas de concreto, carreteras.               |
|  |  |  |  |

#### 10. Desarrollo humano

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| Ausencia de actividades humanas.  | Al menos una actividad humana: ganadería, agricultura o piscícola.                  | Al menos tres actividades humanas: agrícolas, ganadería, piscícola, doméstica (casa/comercio). | Actividades agrícolas, ganadería, piscícola, doméstica (casa/comercio)                |
|  |  |            |  |

### 11. Presencia de desechos orgánicos

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| <15% de presencia de materia orgánica nativa.                                     | Entre 20-40% de presencia de materia orgánica nativa.                             | Entre 50-80% de presencia de materia orgánica no nativa.                           | >90% de presencia de materia orgánica no nativa.                                    |
|  |  |  |  |

### 12. Presencia de contaminación inorgánica

|  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| <10% de presencia de desechos inorgánicos.   | Entre 20-40% de presencia de desechos inorgánicos.                                 | Entre 50-80% de presencia de desechos inorgánicos.                                  | >90% de presencia de desechos inorgánicos.   |
|  |  |  |  |

### 13. Presencia de protección

|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| Con protección dentro de un área dentro de 4-10 metros, con acceso limitado.        | Con protección dentro de un área de 4-10 metros con libre acceso.                   | Presencia de protección de concreto en menos de 5 metros alrededor.  | Ausencia de protección.   |
|  |  | <br>Fuente: Caritas Burundi. |  |

#### **6.4 Tipificación y calificación de manantiales.**

Los manantiales presentaron una estructura hidromorfológica heterogénea, principalmente basada en el volumen de agua, la cobertura de la vegetación y el tipo de sustrato. En seguida, se describe cada uno de los manantiales/arroyos evaluados, junto con la calificación obtenida por el Protocolo HYQI y la calificación del Índice de Calidad Hidrogeomorfológica para manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena (ICaHMa) y la respectiva imagen del sitio.

##### **Presa Cieneguillas (PCG)**



Calificación *HYQI*: 96.5

Calificación *ICaHMa*: 97

Descripción: Se evaluó el arroyo originado del manantial, específicamente en la descarga generada de su primer represamiento. Es el punto de muestreo con mayor altura. La vegetación que rodea el sitio

es de plantas y arbustos de zonas semifrías, como pastos, pinos y herbáceas. Hay presas de concreto aguas arriba y aguas abajo. Se observa desechos inorgánicos y orgánicos como plásticos, excretas de ganado y aceites sobre los pastos de alrededor y aguas arriba de la presa. Este sitio como otros manantiales, tiene registros de ser conocido y utilizado desde tiempo atrás (Jujnovsky, 2003).

##### **Cieneguillas 1 (CG1)**



Calificación *HYQI*: 99

Calificación *ICaHMa*: 109

Descripción: Manantial primario, tipo filtración, no se observa el orificio directamente pero se observa que el agua emana de esa zona, además forma un pequeño arroyo. Se encuentra rodeado de

herbáceas, pastos, y rocas de diferentes tamaños. Cercano al cuerpo de agua se observaron residuos de aceite en los pastos. Cieneguillas 1 se ubica cercano a un camino vehicular, sin embargo, por la altura en se que encuentra su accesibilidad es menor.

### **Cieneguillas 2 (CG2)**



Calificación *HYQI*: 102

Calificación *ICaHMa*: 109

Descripción: Manantial primario, tipo filtración, que forma una pequeña piscina para después formar un pequeño arroyo. Lo rodean pastos, herbáceas y pinos. Se observa presencia de aceites y una presa de

ladrillo aguas abajo del arroyo. Se localiza a unos cuantos metros del Manantial Cieneguillas 1, por lo que su vegetación es muy parecida.

### **Cañada de Manantial de Cuervos (CMC)**



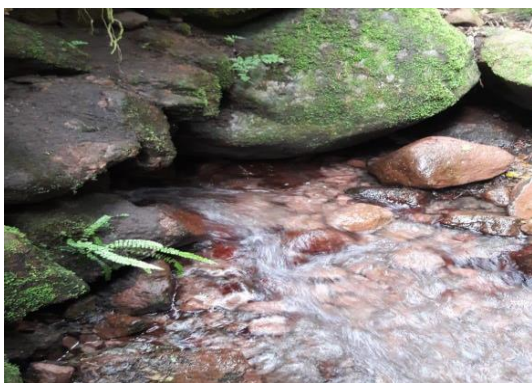
Calificación *HYQI*: 79

Calificación *ICaHMa*: 94

Descripción: De la misma forma que otros sitios, por la dificultad de llegar al manantial el muestreo se realizó en la corriente del mismo, el cual se encuentra rodeado de pastos y herbáceas. El área que rodea el

arroyo muestra deforestación y presencia de represamiento, aguas arriba y abajo por geocostales de sedimentos diferentes a los sedimentos dispuestos en el canal. Se encuentra lejano al camino vehicular; y cercano a las torres de luz.

### **Manantial Magdalena Barbechos (MMB)**



Calificación *HYQI*: 103

Calificación *ICaHMa*: 75

Descripción: Manantial secundario, ya que no es fácil observar el orificio de descarga y de forma natural se encuentra cubierto por una roca volcánica, lo que le permite se forme una pequeña piscina entre ellos, para

después formar un arroyo. La zona está rodeada de grandes rocas cubiertas de musgo, arbustos no nativos y pocos helechos. En algunas partes de la corriente se observa la

presencia de canalización y entubamiento, además de perturbación como remoción de tierra. El manantial se ubica cercano a un camino por donde transitan vehículos.

### **Cañada de Cuervos (CDC)**



Calificación *HYQI*: 88

Calificación *ICaHMa*: 97

Descripción: Por la dificultad del acceso al manantial se evaluó el arroyo producto de su escurrimiento. La toma de muestra se realizó en una de las descargas de su pequeña presa, la cual genera una zona de piscina poco profunda para seguir su recorrido como arroyo. Se encuentra rodeado de pastos pequeños, cantos y rocas donde proliferan macroalgas. Para su acceso es necesario caminar alrededor de cinco minutos desde el camino vehicular y hay evidencias de presencia de actividades humanas como marcas de pintura en las rocas de alrededor. Al igual que otros manantiales ya mencionados, Cañada de Cuervos también es uno de los sitios bien ubicados de fácil acceso y por lo tanto ampliamente utilizados.

### **Temascalco (TMC):**

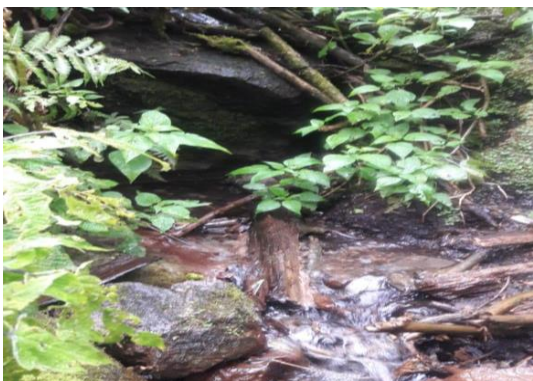


Calificación *HYQI*: 93

Calificación *ICaHMa*: 103

Descripción: Manantial secundario, no se observa con facilidad la descarga y está cubierto por grandes rocas. Se encuentra rodeado de musgos, helechos, arbustos y encinos, presenta gran cantidad de materia orgánica de la misma vegetación circundante. En el arroyo generado existe evidencia de intentos de ser entubado, además aguas abajo se registró la presencia de una presa donde se juntan la corriente de este manantial y el del manantial San José, los cuales se sitúan a pocos metros de distancia. De acuerdo con Jujnovsky (2003) estos dos cuerpos de agua son reconocidos y utilizados desde tiempo atrás por la comunidad local.

### San José (SNJ)



Calificación *HYQI*: 92.5

Calificación *ICaHMa*: 112

Descripción: Manantial secundario, ya que no se observa con facilidad la descarga y se encuentra cubierto por grandes rocas. Se localiza en una pendiente de 30° a 45°. Rodeado de vegetación como musgos,

helechos, arbustos, encinos y gran cantidad de materia orgánica proveniente de los árboles circundantes. El arroyo que genera el manantial fluye hasta una presa aguas abajo.

### Potrero (PTR)



Calificación *HYQI*: 78

Calificación *ICaHMa*: 87

Descripción: Manantial que ha sido entubado, represado y enrejado para su uso y cuidado. El acceso al mismo no es fácil, ya que se encuentra lejano a caminos concurridos. Su caudal drena hacia una serie

de presas aguas abajo que retienen el agua, el muestreo se realizó en el canal a la primera presa. La zona está rodeada de arbustos pequeños y árboles de ciprés en bosque de pino. Manantial descubierto y utilizado por los pobladores desde hace algunos años (Jujnovsky, 2003).

### La Bodega (LBG)



Calificación *HYQI*: 71.5

Calificación *ICaHMa*: 103

Descripción: Manantial primario, de filtración, de tamaño pequeño, a cielo abierto. Genera una pequeña piscina que, después forma un riachuelo, rodeado de pocos árboles y hojarasca de los mismos, pastos, y poca cantidad de helechos y musgos. El área del manantial se encuentra enrejada y dentro de la misma zona se muestran indicios de construcción, a pesar de los límites de acceso se pueden observar residuos de envolturas de alimentos. Se ubica a orillas de un camino transitado y de fácil accesibilidad.

### La Rosita Alto (LRA)



Calificación *HYQI*: 110.5

Calificación *ICaHMa*: 112

Descripción: Arroyo generado por un manantial que, a pesar de situarse cercano a un camino, no muestra contaminación visual o restos orgánicos alóctonos al sitio. Se encuentra rodeado de gran cantidad de vegetación arbustiva, pequeñas plantas, árboles y musgo en las grandes rocas que encauzan su dirección.

### **Manantial La Rosita (MLR)**



Calificación *HYQI*: 90.5

Calificación *ICaHMa*: 78

Descripción: En este sitio es difícil acceder al manantial por las condiciones del terreno, de tal manera que se evaluó el arroyo que escurría inmediatamente después del manantial. Es uno de los puntos que más

muestra evidencia de modificaciones por influencia humana, ha sido canalizado y entubado. Lo rodean gran cantidad de helechos, rocas y herbáceas de tamaño mediano. El canal está sobre una pendiente de entre 50° y 60°. Se puede observar presencia de residuos inorgánicos como envolturas de alimentos y botellas de plástico. El arroyo se encuentra cercano a un camino por donde transitan coches.

### **Manantial Ermita San José (MES)**



Calificación *HYQI* : 93.5

Calificación *ICaHMa* : 60

Descripción: Manantial secundario, que de forma natural está cubierto por una roca de origen volcánico, rodeado de helechos, musgos sobre las rocas circundantes y materia orgánica generada de la vegetación

aledaña. Se sitúa sobre una pendiente de entre 30° y 45°. Debajo de la pequeña corriente que genera el manantial se ubica una pequeña capilla, lo que indica accesibilidad a él. En el arroyo generado, después del nacimiento del manantial, se puede observar espuma la cual puede ser generada por uso de jabón cercano al cuerpo de agua.



## 6.5 Identificación de algas

Se reconocieron veintidós especies de algas con crecimientos visibles, cinco Cianobacterias, seis Chlorophyta, una Heterokontophyta y dos Rhodophyta. Las especies más abundantes fueron *Nostoc* sp., *Desmonostoc* sp. y *Placoma* sff. *regulare* y la más frecuente *Nostoc* sp. Las asociaciones más frecuentes se establecieron entre las especies *Nostoc* sp. con algas rojas y algas verdes en los manantiales MCC y SNJ. Las formas de crecimiento dominante fueron colonias mucilaginosas y filamentos filiformes. Los filamentos del manantial la Bodega están conformados por cadenas de células de diatomeas. En tres sitios no se encontraron algas: MES, MLR y CMC (Tabla 5).

**Tabla 5.** Especies algales estructurales y el promedio de cobertura porcentual registrada durante las tres colectas en los manantiales de la Subcuenca del río Magdalena (El número enseguida de las especies algales se relaciona con el número presente en las fotografías microscópicas de las mismas).

|   |  |                          |
|---|--|--------------------------|
| <b>Arroyo:</b><br><b>La Rosita Alto</b> | Especie estructural:<br><i>Placoma regulate</i> <sub>1</sub> | Cobertura:<br><b>1 %</b> |
|---|--|--------------------------|



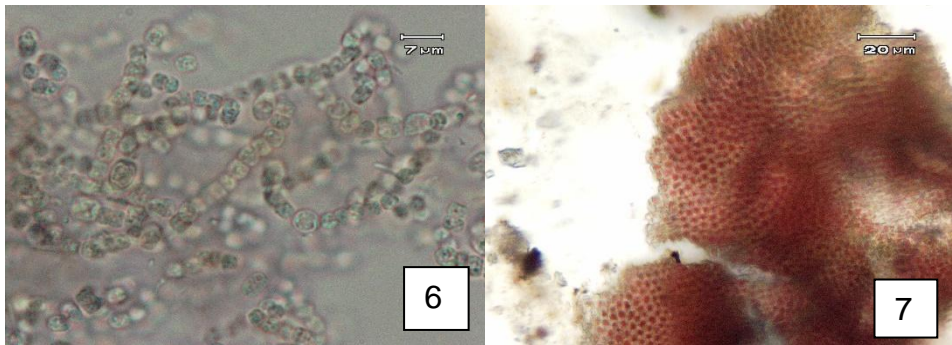
|                                     |   |                           |
|-------------------------------------|---|---------------------------|
| <b>Manantial:</b><br><b>Potrero</b> | Especie estructural:<br><i>Desmonostoc</i> sp. <sub>2</sub> | Cobertura:<br><b>100%</b> |
|-------------------------------------|---|---------------------------|



|   |   |                             |
|---|---|-----------------------------|
| <p><b>Manantial:</b><br/><b>La Bodega</b></p> | <p>Especies estructurales:<br/> <i>Melosira varians</i> (D)<br/> <i>Gomphonema capitatum</i> (D)<sub>3</sub><br/> <i>Rhoicosphaenia</i> sp. (D)<br/> <i>Stauroneis acuta</i> (D)<sub>4</sub><br/> <i>Spirogyra</i> sp1<br/> <i>Diatoma mesodon</i> (D)<br/> <i>Surirella spiralis</i> (D)<br/> <i>Pinnularia</i> sp.(D)<sub>5</sub></p> | <p>Cobertura:<br/>100 %</p> |
|---|---|-----------------------------|



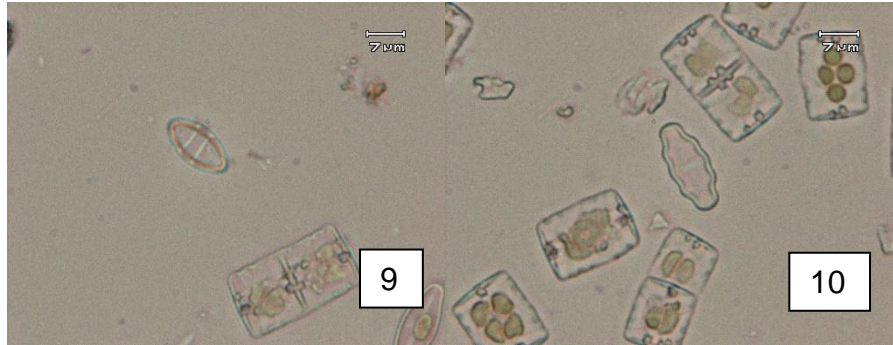
|  |   |                           |
|--|---|---------------------------|
| <p><b>Manantial:</b><br/><b>San José</b></p> | <p>Especies estructurales:<br/> <i>Nostoc</i> sp. <sub>6</sub><br/> <i>Hildenbrandia rivularis</i> <sub>7</sub><br/> Fase <i>Chantransia</i><br/> <i>Coleodesmium wrangelii</i></p> | <p>Cobertura:<br/>26%</p> |
|--|---|---------------------------|



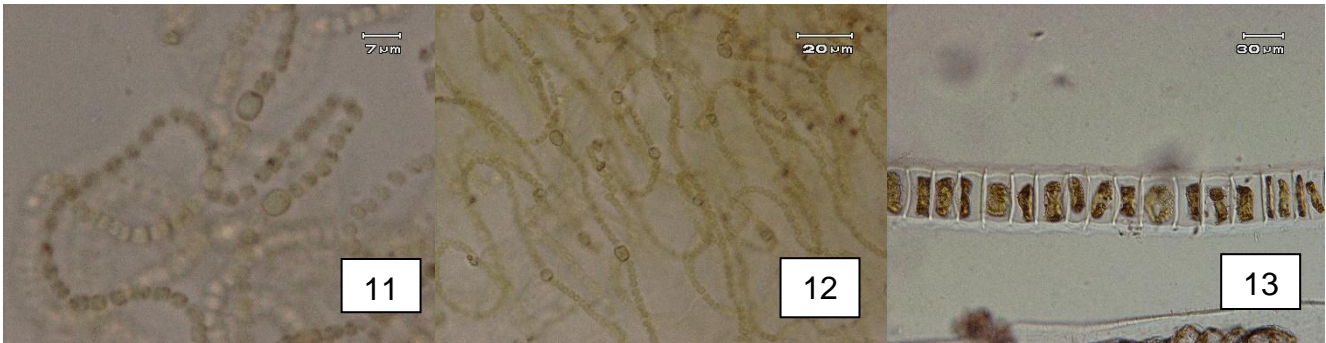
|  |  |                           |
|--|--|---------------------------|
| <p><b>Manantial:</b><br/><b>Temascalco</b></p> | <p>Especie estructural:<br/><i>Nostoc</i> sp. <sub>8</sub></p> | <p>Cobertura:<br/>1 %</p> |
|--|--|---------------------------|



|   |  |                           |
|---|--|---------------------------|
| <p><b>Manantial Magdalena<br/>Barbechos</b></p> | <p>Especies estructurales:<br/><i>Placoma regulare</i><br/><i>Diatoma mesodon (D)</i> <sup>9</sup><br/><i>Luticola geopertiana (D)</i> <sup>10</sup></p> | <p>Cobertura:<br/>10%</p> |
|---|--|---------------------------|



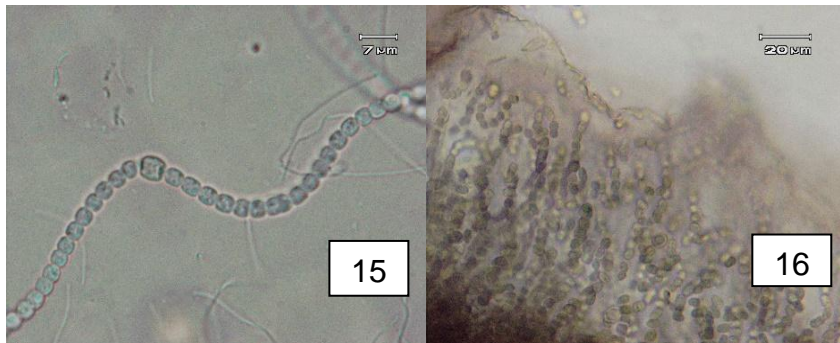
|  |   |                           |
|--|---|---------------------------|
| <p><b>Manantial:<br/>Cañada de Cuervos</b></p> | <p>Especies estructurales:<br/><i>Nostoc</i> sp. <sup>11</sup><br/><i>Desmonostoc</i> sp. <sup>12</sup><br/><i>Ulothrix</i> sp. <sup>13</sup><br/><i>Spirogyra</i> sp. <sup>2</sup><br/><i>Rhizoclonium</i> sp.<br/><i>Oedogonium</i> sp.<br/><i>Vaucheria bursata</i><br/><i>Desmonostoc</i> sp.</p> | <p>Cobertura:<br/>40%</p> |
|--|---|---------------------------|



|   |   |                           |
|---|---|---------------------------|
| <p><b>Manantial:<br/>Cieneguillas 1</b></p> | <p>Especie estructural:<br/><i>Nostoc</i> sp. <sup>14</sup></p> | <p>Cobertura:<br/>40%</p> |
|---|---|---------------------------|



|                                      |   |                   |
|--------------------------------------|---|-------------------|
| <b>Manantial:<br/>Cieneguillas 2</b> | Especie estructural:<br><i>Compactonostoc</i> sp. 15,16 | Cobertura:<br>10% |
|--------------------------------------|---|-------------------|



|                                       |  |                   |
|---------------------------------------|--|-------------------|
| <b>Arroyo:<br/>Presa Cieneguillas</b> | Especies estructurales:<br><i>Oedogonium</i> sp. 17<br><i>Spirogyra</i> sp1 18<br><i>Microspora</i> sp. 19<br>Fase Chantransia | Cobertura:<br>93% |
|---------------------------------------|--|-------------------|



## 6.6 Integración de resultados

Con el fin de tener un panorama completo de los resultados, se integraron las calificaciones obtenidas de los índices *Hydromorphology Quality Index* e Índice de Calidad Hidromorfológica para Manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena, así como, el resultado comparativo de las concentraciones de nutrientes registradas con los límites establecidos por las normas nacionales y las algas registradas por cada sitio, todo con el objetivo de facilitar la relación de la información de los trece manantiales/arroyos muestreados en un análisis posterior (*Tabla 6*).

**Tabla 6.** Resumen de los resultados obtenidos de los sitios muestreados. HYQI (Hymorphology Quality Index), ICaHMa (Índice de Calidad Hidromorfológica de la Subcuenca del Río Magdalena), Calf., es la calificación obtenida del protocolo; Calidad, se refiere al nivel de calidad del cuerpo de agua de acuerdo con su calificación; Algas, muestra las algas encontradas por sitio; y, Nutrientes, indica si los nutrientes evaluados comparados con los límites establecidos en las NOM's están fuera del intervalo permisible (S.E.= sin exceder, E.=excede).

| MANANTIAL/<br>ARROYO | HYQI  |         | ICaHMa |         | Algas registradas              | Nutrientes |
|----------------------|-------|---------|--------|---------|--------------------------------|------------|
|                      | Calf. | Calidad | Calf.  | Calidad |                                |            |
| MES                  | 93.5  | Óptimo  | 60     | Mala    | -                              | S.E.       |
| MLR                  | 90.5  | Óptimo  | 78     | Mala    | -                              | S.E.       |
| LRA                  | 110.5 | Óptimo  | 112    | Óptimo  | <i>Placoma aff. regulare</i>   | S.E.       |
| PTR                  | 78    | Media   | 87     | Media   | <i>Desmonostoc sp.</i>         | S.E.       |
| LBG                  | 71.5  | Media   | 103    | Media   | <i>Melosira varians</i>        | S.E.       |
|                      |       |         |        |         | <i>Gomphonema capitatum</i>    |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Rhoicosphaenia sp.</i>      |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Stauroneis acuta</i>        |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Spirogyra sp.1</i>          |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Diatoma mesodon</i>         |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Surirella spiralis</i>      |            |
| SNJ                  | 92.5  | Óptimo  | 112    | Óptimo  | <i>Hildenbrandia rivularis</i> | S.E.       |
|                      |       |         |        |         | <i>Nostoc sp.</i>              |            |
| TMC                  | 93    | Óptimo  | 103    | Media   | <i>Nostoc sp.</i>              | S.E.       |
| MMB                  | 103   | Óptimo  | 75     | Mala    | <i>Placoma</i>                 | S.E.       |
|                      |       |         |        |         | <i>Diatoma mesodon</i>         |            |
| CDC                  | 88    | Óptimo  | 97     | Media   | <i>Nostoc sp.</i>              | S.E.       |
|                      |       |         |        |         | <i>Ulothrix sp.</i>            |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Spirogyra sp. 2</i>         |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Rhizoclonium sp.</i>        |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Oedogonium sp.</i>          |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Vaucheria bursata</i>       |            |
| CMC                  | 79    | Media   | 94     | Media   | -                              | S.E.       |
| CG1                  | 99    | Óptimo  | 109    | Media   | <i>Nostoc sp.</i>              | S.E.       |
| CG2                  | 102   | Óptimo  | 109    | Media   | <i>Compactonostoc sp.</i>      | S.E.       |
| PDC                  | 96.5  | Óptimo  | 97     | Media   | <i>Oedogonium sp.</i>          | S.E.       |
|                      |       |         |        |         | <i>Microspora sp.</i>          |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Spirogyra sp.1</i>          |            |
|                      |       |         |        |         | <i>Fase Chantransia</i>        |            |

# 7. Discusión

## 7.1 Evaluación fisicoquímica

De acuerdo con las características físicas registradas, los manantiales se clasifican como primarios -con zona de descarga notoria-, y secundarios -sin zona de descarga visible, pero con humedad alrededor del mismo y se sitúa debajo de rocas, sedimento y vegetación- (Kresic y Stevanovic, 2010). Además, todos los sitios muestreados son cuerpos de agua pequeños, al igual que su cauce y la velocidad de corriente.

Las características químicas de los manantiales son el resultado de la interacción con la roca que almacena el agua en el subsuelo (Kresic y Stevanovic, 2010). Al salir a superficie, la química se ve modificada por las diferentes interacciones con su nuevo ambiente, agregando nutrientes, que pueden ser o no perjudiciales para el ecosistema.

De los nutrientes que se evaluaron, sólo los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) forman parte del patrón presente de iones en manantiales (Kresic y Stevanovic, 2010). La cantidad promedio de los mismos fue de 5.39 mg/L, que comparándolo con el límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994 se encuentra muy por debajo; por lo que, los sulfatos no muestran ser un compuesto nocivo o consecuencia de contaminación sino una característica natural de los manantiales.

A diferencia de lo anterior, nutrientes como el nitrógeno ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) y el fósforo ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), no son parte de los iones que de manera natural se encuentran presentes en las aguas de manantial, al contrario, son asociados con procesos de suelo como lixiviados, sustancias orgánicas y contaminación por grandes cantidades de materia orgánica, fertilizantes y aguas residuales, que se infiltran en zonas de recarga al acuífero, que se agregan *in situ* al manantial o en la corriente que generan (De Miguel-Fernández y Vázquez-Taset, 2006). Los resultados obtenidos en los sitios, de la misma forma que para los sulfatos, no superan los límites establecidos por las normas NOM-127-SSA1-1994 para la concentración de nitritos, nitratos y amonio, y la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 para las concentraciones de ortofosfatos. Por lo tanto, las concentraciones registradas no muestran ser perjudiciales para los organismos que habitan en los manantiales/arroyos, es decir, no indican tener presencia de sustancias inorgánicas superiores a lo que el ecosistema podría soportar ni tampoco señala presencia excesiva de sustancias generadas por actividad antropogénica.

## **7.2 Análisis comparativo entre Hydromorphology Quality Index (HYQI) e Índice de Calidad Hidromorfológica para Manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena (ICaHMa).**

### **7.2.1 Calidad del hábitat ripario**

A diferencia del HYQI, el protocolo ICaHMa, se enfocó en la evaluación del área circundante y se orientó en conjuntar las valoraciones de la integridad ecológica, las perturbaciones posibles como extracción y contaminación, evidenciar descargas de agua y de uso/consumo, que de acuerdo a Barquin y Scraksbrook (2008) para mantener un estado saludable de los manantiales es necesario evitar y/o controlar los parámetros ya antes mencionados.

La calidad del hábitat riparia de los manantiales evaluó los parámetros de cobertura vegetal nativa, el desarrollo de ganadería y agricultura, perturbación del sustrato y estabilidad del flujo base; las dos primeras son parámetros que no fueron modificados del HYQI, ya que mostraron ser funcionales, las últimas dos fueron adaptadas para ser evaluadas en los manantiales, en “la estabilidad del flujo base” se observaron las modificaciones en el sustrato expuesto en la piscina o canal que indican cambios de nivel en la descarga del manantial (Barbour *et al.*, 1999), y el parámetro “perturbación del sustrato” mostró, como su nombre lo indica, las perturbaciones en el sustrato que evidencian toma de agua de forma que alteran la hidromorfología del ecosistema (Kresic y Stevanovic, 2010).

### **7.2.2 Hidrología**

La segunda sección se enfocó en la evaluación de la hidrología general de los manantiales, de acuerdo con tres parámetros: alteración del canal, presencia de presas y presencia de tuberías artesanales, la primera -alteración del canal- mostró ser un parámetro que, al igual que el protocolo HYQI, es funcional para manantiales, los últimos dos fueron adaptados para una correcta calificación de los cuerpos de agua. La “presencia de presas”, no sólo se enfocó en la existencia o no de presas, ya sea aguas arriba o abajo de la zona de muestreo, sino que hizo hincapié en la cantidad de agua que pasa por ellas, lo que se evaluó de acuerdo con el tipo de material del que están elaboradas. De esta forma, se conoce de manera más específica qué cantidad de agua potencialmente se está quedando estancada y cuánta es la que potencialmente puede permear el material de la presa y por lo tanto fluir a lo largo del cuerpo de agua, siendo el flujo continuo de agua un parámetro importante para mantener saludable al ecosistema (Kresic y Stevanovic, 2010). El parámetro que evaluó la “presencia de

tuberías artesanales” se integró al protocolo ICaHMa, ya que no era parte de HYQI, bajo la hipótesis de que la hidrología local se ve afectada al desviar el curso natural del agua integrando mangueras o tubos, cambiando el ciclo hidrológico natural (DMA, 2019).

En esta sección se integraron las evaluaciones generales para conocer la hidrología del ecosistema en aguas superficiales que se observaran de forma sencilla, pero con resultados importantes que describen potenciales afectaciones para el mantenimiento y función del ecosistema acuático.

### ***7.2.3 Perturbaciones antropogénicas***

Para evaluar las alteraciones causadas por el ser humano que tienen lugar alrededor y dentro de los manantiales se evaluaron seis parámetros: efluentes directos al manantial por uso doméstico, desarrollo urbano, desarrollo humano, presencia de desechos orgánicos, presencia de desechos inorgánicos y presencia de protección alrededor del cuerpo de agua. Como lo mencionan Veles y Gómez (2008), algunas de las causas que vulneran a cualquier cuerpo de agua son la realización de diferentes actividades humanas dentro de los 10 metros de circunferencia como casa habitación, actividades primarias e industriales, ya que se consideran potenciadores de contaminación. Es por ello, que los tres primeros parámetros -efluentes directos al manantial por uso doméstico, desarrollo urbano, desarrollo humano- se mantuvieron al igual que en HYQI. Mientras que la “presencia de residuos orgánicos” y “presencia de residuos inorgánicos”, fueron desglosadas en comparación con la propuesta del protocolo HYQI, ya que en este último no se hace ninguna diferencia entre la materia orgánica natural encontrada en los sitios con los residuos inorgánicos observados. Esta observación fue importante porque no es el mismo impacto causado por la materia orgánica generada por vegetación circundante, que la materia orgánica ajena al sitio o la materia inorgánica que no es parte de la naturaleza y que su proceso de reciclaje y desintegración es completamente diferente al de los residuos orgánicos (Kresic y Stevanovic, 2010). Por último, el parámetro que se agregó, ya que no estaba contemplado en HYQI fue “la presencia de protección alrededor del manantial”, a pesar de que la protección es una modificación a la naturalidad del mismo, también disminuye en gran cantidad la vulnerabilidad a ser contaminado o extraído en exceso por el humano ya que limita su accesibilidad, con el fin de obtener una evaluación más robusta y correcta se consideró qué tan fácil es la accesibilidad al cuerpo de agua (Kresic y Stevanovic, 2010).

Esta sección se modificó de tal manera que se intentaron cubrir todas las potenciales causas de alteración observadas en el ecosistema y no dejar ninguna potencial



alteración de causa humana fuera de la evaluación, ya que en las últimas décadas la explotación, extinción y contaminación de los ecosistemas han sido relacionadas principalmente con acciones atribuibles a la actividad humana (SINA, 2019).

#### **7.2.4 Evaluación**

La evaluación global se decidió establecer en cuatro categorías: Óptima, Media, Mala y Deficiente, guiados por la propuesta de la DMA (2019), de tal manera que las cuatro categorías muestran con mayor confiabilidad una evaluación de la calidad de los manantiales que si solo se utilizaran tres categorías, lo que significaría que la diferencia entre calidades es muy marcada, lo cual es erróneo.

En la Tabla 6 es posible observar con mayor facilidad las diferencias entre las calificaciones obtenidas entre los protocolos HYQI e ICaHMa. Se observó que ocho de los trece manantiales/arroyos califican con una calidad superior con el protocolo para ríos (HYQI) que con la obtenida por ICaHMa que fue adaptado a los manantiales, lo que demuestra la relevancia de utilizar un protocolo específico al cuerpo de agua que se quiere evaluar, de lo contrario se obtendrá información errónea del mismo.

Es importante mencionar, como ya se ha hecho con anterioridad, que para obtener evaluaciones completas de un cuerpo de agua y poder entender la dinámica del mismo es necesario conocer el área de estudio *in situ* con evaluaciones de parámetros físicoquímicos, biológicos e hidromorfológicos, y con previa información obtenida de tecnologías de sistemas de información geográfica, lo que proporcionará una perspectiva más amplia del ecosistema, y por tanto una mejor decisión para la conservación y restauración de los cuerpos de agua (Carmona *et al.*, 2016).

### **7.3 Tipificación y calificación de los manantiales**

La sección de Calidad del hábitat ripario mostró que, para ambos índices (HYQI y ICaHMa) es alta, ya que la vegetación nativa de ribera predomina en la Subcuenca del Río Magdalena, observándose principalmente helechos y musgos en los sitios estudiados. En los manantiales se registraron descargas de agua muy bajas pero constantes, por lo que se identificaron como cuerpos de agua poco modificados. Así mismo, se observaron pocas zonas alrededor de los manantiales ocupadas por actividades primarias. Por lo que, a pesar de que algunos sitios obtuvieron calificaciones bajas en esta sección -MES, PTR y PDC-, en general la calidad del área riparia se muestra aceptable.

La evaluación Hidrológica fue la segunda sección del protocolo, donde la calificación promedio de los dos índices fue de veintidós y veintitrés puntos, con un máximo de

treinta (ICaHMa) y cuarenta (HYQI). El mismo promedio respalda la cancelación del parámetro “Estado del canal”, ya que, ese punto no contribuía en la evaluación de los manantiales. De acuerdo a las calificaciones obtenidas, se infiere que la hidrología de los manantiales/arroyos ha sido modificada, pero sin tener afectaciones importantes. Los sitios que obtuvieron menor calificación fueron MLR y PTR. En la mayoría de los sitios se registraron modificaciones en la morfología de los manantiales con represamientos (presas) tanto aguas abajo como aguas arriba, pero sin impedir el paso del agua por completo, es decir, el material de las presas permite el paso de agua y sólo detiene el flujo de forma temporal y parcial. También se registró evidencia de canalización y presencia de tuberías artesanales en al menos la mitad de los sitios, esto indica que los sitios evaluados son una fuente de abastecimiento importante ya que las presas y tuberías facilitan la extracción y desvío del agua a conveniencia de los consumidores locales.

Por último, las perturbaciones antropogénicas indicaron ser de mediana calidad, ya que, a pesar de no encontrar ningún sitio con efluentes directos a los cuerpos de agua, si hay evidencia y presencia de residuos inorgánicos y orgánicos ajenos a los mismos, que se relaciona con la poca protección que tienen y alta facilidad de acceder, además, la mayoría de los sitios se ubican cercanos a caminos o senderos y a localidades humanas. Los manantiales con mayor perturbación fueron MES y MMB.

#### **7.4 Validación de calidad con algas**

La frecuencia y abundancia de las cianobacterias *Nostoc*, *Desmonostoc* y *Placoma* en los manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena pueden estar relacionadas con las condiciones particulares descritas en este ambiente: agua con relativa estabilidad fisicoquímica y sujetas a una escasa acción humana. En particular, las cianobacterias pueden fijar nitrógeno atmosférico e indican preferencia por condiciones oligotróficas en los cuerpos de agua (Bellinger y Sigee, 2010). De acuerdo con Carmona *et al.*, (2019), las poblaciones de *Nostoc* se establecen en corrientes moderadas a elevadas, bajas concentraciones de fósforo y nitrógeno, además de estar ampliamente distribuidas en la Cuenca de México. De acuerdo con lo anterior, el género *Nostoc* valida la calidad de los sitios como cuerpos de agua con bajas concentraciones de nutrientes, siendo manantiales/arroyos oligotróficos.

El arroyo de PCG mostró presencia de filamentos de Chlorophyta, que son uno de los principales productores de biomasa en sistemas de agua dulce, pudiendo formar densas floraciones y crecimientos de perifiton (Bellinger y Sigee, 2010). Las especies colectadas en PCG fueron: *Oedogonium* sp., *Spirogyra* sp. y *Microspora* sp., las cuales prefieren

hábitats con velocidad de corriente de moderada a alta, turbulenta y baja concentración de nutrientes (Carmona *et al.*, 2019). La presencia de estas algas, a excepción del género *Spirogyra* sp (que tuvo mayor distribución y registro en sitios con alta concentración de nutrientes), son indicadores de sistemas acuáticos con una calidad ecológica buena, que, a su vez, coincide con los resultados de la evaluación hidromorfológica.

En el sitio CDC se registró la mayor diversidad de macroalgas, Chlorophyta (*Odegonium*, *Rhizoclonium*, *Spirogyra* sp. y *Ulothrix*), las cianobacterias (*Nostoc* y *Desmonostoc*) y la Heterokontophyta Vaucheriaceae (*Vaucheria bursata*). Esta diversidad puede deberse a que es un río de segundo orden que recibe aportes de manantiales y materia orgánica que se puede incorporar a lo largo de aproximadamente 300 metros. Adicionalmente, este sitio se describió como río perenne, limpio sin desechos tanto orgánicos como inorgánicos de origen humano, una amplia diversidad de sustratos (en tamaño y forma) y se ubicó lejos de caminos o carreteras. Las algas colectadas en este sitio se caracterizan por desarrollarse en velocidades de corriente moderadas a elevadas y en sistemas acuáticos oligotróficos a mesotróficos (Carmona *et al.*, 2019).

Respecto al registro de diatomeas, en los sitios LBG y MMB se reconocieron consorcios dominados por la presencia de la especie *Melosira varians*, habitante frecuente de sistemas con importante concentración de nutrientes (Necchi, 2016). Esto se relaciona con la evaluación registrada en estos sitios, ambos obtuvieron calificación de calidad hidromorfológica mala, principalmente por el impacto antropogénico relacionado con la presencia de residuos sólidos, el entubamiento del cuerpo de agua y la facilidad de acceso por la cercanía con caminos.

Se encontraron dos especies relevantes en arroyo de PTR y el manantial SNJ. La primera, la cianobacteria *Desmonostoc* sp., la cual ha sido reportada para ríos oligotróficos a mesotróficos en otros sitios de la cuenca de México (Carmona, 2019). La segunda, el alga roja *Hidenbrandia rivularis*, descrita para ríos oligotróficos de regiones templadas (Wehr y Sheath, 2003). Las dos especies de algas mencionadas son de gran relevancia ya que no se tenía registro de ellas en la Subcuenca del Río Magdalena y particularmente *H. rivularis* no tenía registro previo para el país (Carmona *et al.*, 2002), por lo que este primer registro en el área de estudio, deja de manifiesto la importancia en la investigación, conservación y protección, no sólo de los manantiales y cuerpos de agua de esta subcuenca, sino en general de toda la zona de conservación.

## 8. Conclusiones

De acuerdo a los objetivos del trabajo, los parámetros fisicoquímicos, hidromorfológicos, la validación biológica con algas y la observación de las principales actividades alrededor de los sitios evaluados permitieron conocerlos y determinar los principales impactos que sufren, que aunado a las adaptaciones realizadas al *Hydromorphology Index Quality* se logró proporcionar un protocolo actualizado y revisado para la evaluación de manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena.

El Índice de Calidad Hidromorfológica para Manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena (ICaHMa) muestra ser una herramienta rápida, útil y de fácil manejo para cualquier persona interesada en conocer la salud o naturalidad de un manantial o arroyo que derive del mismo, ya que es una primera evaluación, sin la necesidad de herramientas costosas. Consta de trece parámetros distribuidos en tres categorías: Calidad del hábitat ripario, hidrología y perturbaciones antropogénicas, en las cuales intenta abarcar las principales evidencias para conocer la salud del manantial y posteriormente tomar decisiones respecto al mismo.

El ICaHMa está orientado a los manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena, a pesar de ello, puede ser utilizado en cualquier otra zona con características similares, como la geología, el grado del manantial y en zonas de montaña.

En general, el ecosistema mostró calidad media, lo que significa que hay sitios que muestran impactos por contaminación y alteración humana, que puede afectar a el abasto local de agua en la comunidad de la Magdalena, por lo que es importante tomar cartas en el asunto para mantener y mejorar un buen estado ecológico del mismo.

La presencia de macroalgas anteriormente no registradas en la Magdalena Contreras como *Desmonostoc* sp. y *Hildenbrandia rivularis* hacen referencia al potencial en términos de biodiversidad y riqueza exclusiva de estos ambientes particulares (los manantiales), que requiere mayor atención e investigación en la zona, ya que difieren de lo registrado en el río.

Este trabajo generó información importante en diferentes sentidos, que deben ser tomados en cuenta para el mejor monitoreo de la subcuenca y de los manantiales, además de ser un parteaguas en trabajos a futuro relacionados.

De acuerdo a la investigación, es esencial seguir la caracterización de la integridad ecológica de los manantiales en México, ya que, es uno de los cuerpos de agua

mayormente utilizados por las comunidades locales y sin ningún protocolo para su manejo y conservación por la autoridad y, por tanto, debería ser incorporado al sistema de NOM como indicadores de integridad ecológica.

# Bibliografía

- Almeda-Leñero, L., Nava, M., Ramos, A., Espinosa, M., Ordoñez, M. y Jujnovsky, J. (2007) Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Gaceta ecológica. Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de México. 84-85pp.
- Andreasen, J. K., *et al.* (2001): "Considerations for the development of a terrestrial index of ecological integrity", *Ecological Indicators*, 1, 21-35pp.
- Ávila-Akerberg, V. (2010). Forest quality in the southwest of Mexico City. Assessment towards ecological restoration of ecosystem services. Instituto für Landespflege. Schriftenreihe des Instituts für Landespflege der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Culterra 56, Freiburg. 138 pp.
- Barbour, M.T., Gerritsen J., Snyder, B.D. y Stribling, J.B. (1999) Rapid Bioassessment Protocols for use in Streams and Wadeable Rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish, Second Edition. EPA 841-B-99-002 U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C. (<http://www.epa.gov/OWOW/monitoring/techmon.html>).
- Barquín, J. y Scarsbrook, M. (2007). Management and conservation strategies for coldwater springs. *Aquatic conservation: Marine and freshwater ecosystems*. Hamilton 18:580-591.
- Bellinger, E. y Sigee, D. (2010). *Freshwater Algae. Identification and use as bioindicators*. UK. Wiley-Blackwell. ISBN 978-0-470-05814-5
- Brune, G., (1975). Major and Historical Springs of Texas. Report 189, Texas Water Development Board, Austin.
- Burundi, C. (s.f.) Wikiwater. (Imagen) Tomado de <https://wikiwater.fr/e3-bis-la-captacion-y-el>
- Camacho, A., de Wit, R. (2003) Effect of nitrogen and phosphorus additions on a benthic microbial mat from a hypersaline lake. *Aquat Microb Ecol* 32:261–273
- Carmona, J., Caro, A. y Salinas, V. (2019) *Diversidad e indicadores ecológicos en ríos de la Cuenca de México*. Primera edición. Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México. 174 pp
- Carmona, J., Ramírez, R., Bojorge-García, M., González, B. y Cantoral-Uriza, E. (2016) Estudio de valor indicador de las comunidades de algas bentónicas: una propuesta de evaluación y aplicación en el Río Magdalena, Ciudad de México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 32 (2).
- Carmona-Jiménez, J., Montejano, Z.G. y González-González, J. (2002) Taxonomía y distribución de *Hildenbrandia Nardo, 1834* (Hildenbrandiales, Rhodophyta) de agua dulce en la región central de México. *Hidrobiológica* 12 (1): 7-14pp
- Clean Water Act. (1972) Federal Water Pollution Control Act Amendments. U.S. Environmental Protection Agency. October 8, 1972.

- Cortes, RMV., Hughes, SJ., Rodríguez-Pereira, V., Pinto-Varandas, S., (2013) Tools for bioindicators assessment in rivers: The importance of special scale, land use patterns and biotic integration. *Ecol. Indic.* 34:460-477.
- Crujkshank-Villanueva, C. (1992) Relación entre las aguas superficiales y las subterráneas en una cuenca. *Ingeniería Hidráulica en México*. UNAM. 52-63 pp.
- Custodio, E. y Llamas, M. (1983) *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega S.A. Barcelona, Tomo 1. 1102-1153pp.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., *et al.*, (2002). Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* 10 (2), 340–345.
- Dăscălița, D. (2010) Minimum criteria of the hydromorphological parameters necessary to protect the aquatic ecosystems of Rivers. *Studii și Cercetări*. Bacău, Romania. 8-19pp.
- De Miguel-Fernández, y Vázquez-Taset, (2006) Origen de los nitratos, (NO<sub>3</sub>) y nitritos (NO<sub>2</sub>) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*. 22 pp
- Death, R.G.; Barquín, J.; Scarsbrook, M.R. (2004) *Coldwater and Geothermal Springs*.; Mosley, M.P.; Pearson, C.; Sorrell, B. (Eds): *Freshwaters of Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, 1999. Groundwater protection schemes*. Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, Dublin. 30 pp
- Encanada, A.C., Rieradevall, M. , Ríos-Touma, B., García, N. y Prat, N.(2011). *Protocolo simplificado y guía de evaluación de calidad ecológica de ríos andinos (CERAS)*. USFQ,UB,AECID,FONAG.Quito,83 pp.
- Fernández D., Barquin J., Raven PJ (2011) A review of river hábitat characterisation methods: indices vs. characterisation protocols. *Limnetica* 30(2):217–234pp
- Ferraro, SP. y Cole, FA., (1990). Taxonomic level and sample size sufficient for assessing pollution impacts on the Southern California Bight macrobenthos. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 67:251-262.
- Ferrusquía-Villafranca, F. (1998). *Geología de México: una sinopsis*. En: *Diversidad biológica de México. Orígenes y distribución*. (T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot, J. Fa Eds.). Instituto de Biología, UNAM, México, pp. 3-108.
- García E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía. Ciudad de México, México, 246 pp.
- García, E. (1988)*Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Cuarta edición. Editorial Larrios, México. 217 pp.
- Graham, L. E. y L. W. Wilcox. (2000) *Algae*. Prentice Hall, Inc. USA. 640 p.
- Hancock, PJ. (2002) Human impacts on the stream-groundwater exchange zone. *Environmental Management* 29: 763–781pp

- Huber Pestalozzi, G., Fott, B. y Komárek, J. (1983) *Das Phytoplankton im Susswasser. Systematik und Biologie Teil 7. Deutschland. 1044pp*
- Jankovská, V. y Komárek, J. (2001) *Review of the green algal pediatrum. Lubrecht y Cramer Ltd. 127 pp.*
- Ujnovsky-Orlandini, J. (2006) *Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, UNAM.*
- Karr, J. (1993). *Defining and Assessing ecological integrity: Beyond water Quality. Environmental Toxicology and Chemistry. Washinton 12, 1521-1531pp.*
- Karr, J. R. (1981) *Assessment of biotic integrity using fish communities. Fisheries, 6: 21-27pp.*
- Karr, J. R. y Chu EW. (2000). *Sustaining living rivers. Hydrobiologia, 422/423: 1-14pp.*
- Kern, K., Fleischhacker, T., Sommer, M., y Kinder, M., (2002). *Ecomorphological survey of large rivers: monitoring and assessment of physical habitat conditions and its relevance to biodiversity. Large Rivers, 3: 1–28.*
- Kirk, B. (s.f) *Classification of springs. U.S.Geological Survey. Washinton, D.C. 522-561 pp*
- Knott, B. y Jasinska, E.T. (1998) *Mound springs in Australia. Studies in crenobiology: the biology of springs and springbrooks. Backhuys Publishers, Leiden. Botosaneanu, L. 23–38pp*
- Komárek, J. y Anagnostidis, K. (2008) *Cyanoprokaryota. Springer Spektrum. N. VI, 548.*
- Kresic, N. y Stevanovic, Z. (2010) *Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management and sustainability. Elsevier Inc. Butterworth-Heinemann 565pp.*
- Kresic, N. (2009) *Groundwater Resources: Sustainability, Management, and Restoration. McGraw-Hill, New York*
- Levine, H. G. (1984) *The use of seaweeds for monitoring coastal waters. In E.L. Shubret, editor, Algae as ecological indicators, Academic Press Inc., London, 189–210pp*
- McCabe, D.J. (1998) *Biological communities in springbrooks. In: Botosaneanu L (ed) Studies in Crenobiology: The biology of springs and springbrooks. Backhuys, Leiden, The Netherlands.*
- Montejano, Cantoral, E., Carmona, J., Gavino R., G. Rivas G., and Rojas A. y F. Valadéz, F. (1999) *Comunidades acuáticas (algas, insectos, y ácaros) indicadoras de la calidad del agua en los ríos permanentes de la región poniente del Distrito Federal (Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa) México. Consejo de estudios para la restauración y valoración ambiental (CONSERVA). Secretaría del medio ambiente del Distrito Federal, México.*
- Naiman, R.J., Decamps, H. y, Pollock, M., (1993). *The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. Ecological Applications, 3: 209-212pp.*



- Nardini, A., Sansoni, G., Schipani, I., Conte, G., Goltara, A., Boz, B., Bizzi, A., Polzzo, A. y Monaci, M. (2018) The wáter framework directive: a soap bubble? An integrative proposal: Flea (Fluvial ecosystem assessment). Centro Italiano per la Riquilificazione Fluviale.
- Necchi, O. (2016) River algae. Springer. Switzerland. 287 p.
- Newson, M.D., Large, A.R.G. (2006) 'Natural' rivers, 'hydromorphological quality' and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology. *Earth Surf Process Land* 31:1606–1624pp
- Norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, "Contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales". Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. México. Diario oficial de la federación el 24 de diciembre de 1996.
- Norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Secretaría de Salud. México. Diario oficial de la federación, 18 de enero de 1996.
- Oliveira, S., y Cortes, R. (2006). Environmental indicators of ecological integrity for running waters in northern Portugal. *Limnetica*. Madrid 25:2, pp 479-498.
- Ollero, A., Ballarín, D., Díaz, E., Mora, D., Sánchez, M., Acín, V., Echeverría, M.T., Granado, D., González, A.I., Sánchez, L. y Sánchez, N. (2007). Un índice hidrogeomorfológico (ihg) para la evaluación del estado ecológico de sistemas fluviales. *Geographicalia* 52:113-141pp.
- Ortiz, R. (2017). Calidad Hidrogeomorfológica de la Cuenca de México: Una propuesta metodológica para reconocer la calidad de ecosistemas de Ribera. (Tesis de posgrado) Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Ospina, N. y Peña, E. (2004) Alternativas de Monitoreo de Calidad de Aguas: Algas como Bioindicadores. *Divulgación y Actualidad Científica* . 2: 4.
- Parrish, J., Braun, D. y Unnasch, R. (2003). Are we conserving what we say we are? Measuring Ecological Integrity within Protected Areas. *BioScience*. 53: 9 851-860pp.
- Parsons, M. y Norris R.H. (1996) The effect of habitat-specific sampling on biological assessment of water quality using a predictive model. *Freshwat. Biol.*, 36: 419-434pp.
- Peña Salamanca, E., Palacios Peñaranda, M. y Ospina-Álvarez, N. (2005) Algas como indicadores de contaminación. Universidad del Valle. Primera edición. Colombia. 41pp.
- Plinski, M., Komárek, J. 2007. Sinice – Cyanobakterie (Cyanoprokaryota). –In: Plinski, M. (ed.) *Flora Zatoki Gdanskiej i wod przyległych (Bałtyk Poludniowy)* 1, Wydaw. Uniw. Gdanskiego, Gdańsk, 172 pp.
- Ramos-Merchante, A. y Prenda, J. (2015) Herramientas para la determinación del estado ecológico de las masas de agua superficiales: I. Indicadores físico-químicos e hidromorfológicos. *El agua*. Deposito legal. Huelva, España.

- Rodríguez, R., Martínez, C., Hernández, D., Veguillas, J. y Acevedo, M. (2003). Calidad de agua de fuentes de manantial en la zona básica de salud de Sigüenza. *Revista Española Salud Pública*. 77:3 423-432pp.
- Sada, D. y Pohlmann, K. (2002) Spring inventory and monitoring protocols. Conference Proceedings. Spring-fed Wetlands: Important Scientific and Cultural Resources of the Intermountain Region. (Línea) Tomado el 17 de noviembre de 2019. De <http://www.wetlands.dri.edu>
- Sahuquillo, A. (2009). La importancia de las Aguas Subterráneas. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat., España* 103: 1, 97-114pp
- Scarsbrook, M.; Barquín, J.; Gray, D. (2007) New Zealand coldwater springs and their biodiversity. *Science for Conservation* 278. Department of Conservation, Wellington. 72pp.
- Sierra, R. (1999) Guía para el Estudio de los Macroinvertebrados Acuáticos del Departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia. Medellín. Colombia. Society Inc., Christchurch.
- Sistema Nacional de Información del Agua (2021) Calidad del agua y acuíferos. Gobierno de México. México.
- Springer, A.E. y Stevens L.E. (2008) Spheres of discharge of springs. *Hydrogeology Journal*. USA DOI 10.1007/s10040-008-0341
- Springer, A.E. y Stevens, L.E., (2009) Spheres of discharge of springs. In: Hancock, P.J., Hunt, R.J., Boulton, A.J. (guest Eds.), *Hydrogeoecology and Groundwater Ecosystems*, *Hydrogeology Journal*, 17(1), 83–93pp.
- Springer, A.E., Stevens, L.E., Anderson, D.E., Parnell, R.A., Kreamer, D.K., Levin, L., Flora, S. (2008) A comprehensive springs classification system: integrating geomorphic, hydrogeochemical, and ecological criteria. In: Stevens LE, Meretsky VJ (eds) *Aridland springs in North America: ecology and conservation*. University of Arizona Press, Tucson, AZ
- Stevenson, R. J. (1996) An introduction to algal ecology in fresh water benthic habitat. In: Stevenson, R.J., M.L. Bothwell & R.L. Lowe (Eds). *Algal ecology: freshwater benthic ecosystems*. Academic Press, San Diego. California, USA, 1-26pp.
- Stoermer, E.F. y Smol, J.P. (1999). *The diatoms: Applications for the environmental and earth science*. Cambridge University Press, Nueva York, EUA, 667 pp.
- Távara-Espinoza, L. & Sanz, E. (2010) Hidrogeología e hidrodinámica del acuífero de los manantiales de Gormaz y su importancia en el caudal base del Río Duero, España. *Tecnología y cuenca de agua*. 1:3 5-20pp.
- Toth, J. (1966) Mapping and interpretation of field phenomena for groundwater reconnaissance in a prairie environment, Alberta, Canada. *Bull Int. Assoc. Sci. Hydrol*. 9:20–68pp
- United States Environmental Protection Agency (2019). *National Rivers and Streams Assessment 2018/19. Field Operations Manual Non-Wadeable*. Versión 1.2.

- van der Kamp, G. (1995) The hydrogeology of springs in relation to the biodiversity of spring fauna: a review. *Journal of the Kansas Entomological Society* 68(2): 4–17.
- Vargas, A. (2002). Manantiales de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. 27, pp 39-52.
- Vélez, L. y Gómez, A. (2008) Un Marco conceptual y analítico para estimar la Integridad Ecológica a escala de paisaje. *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*. 31-44pp
- Wang, W. y Lewis, M.A. (1997) Metal accumulation by aquatic macrophytes. In *Plants for Environmental Studies*. Lewis Publishers, New York.
- Ward, J.V., Sandford, J.A., (1979) *The ecology of regulated streams*. New York: Plenum Press.
- Ward, J.V., Tockner, K., Uehlinger, U., Malard, F., (2001) Understanding natural patterns and processes in river corridors as the basis for effective river restoration. *Regulated Rivers: Research and Management*, 17: 311-323pp.
- Watershed Science Institute (2015). *Index of Biotic Integrity*. Technical Note 2. 25 pp.
- Wehr, J. y Sheath, R. (2003) *Freshwater algae of North America. Ecology and classification*. Academic Press. New York 918 pp.
- Whitton, B. (2012) *Ecology of cyanobacteria II. Their diversity in space and time*. Springer. Durham 760 pp
- Wright, J. F. (1995) Development and use of a system for predicting the macroinvertebrate fauna in flowing waters. *Australian Journal of Ecology*, 20, 181-197.

# ANEXO

## **Índice de Calidad Hidrogeomorfológica para Manantiales de la Subcuenca del Río Magdalena (ICaHMa).**

- Estructura del índice

Debe ser llenada la hoja de datos generales del lugar a evaluar, la fecha, la georreferenciación, altura, si el cuerpo de agua es un manantial o arroyo generado por un manantial, forma de vida predominante y tipo de geología del sitio.

Al utilizar el índice de calidad hidrogeomorfológica de manantiales y arroyos, es necesario que la/el evaluador tenga conocimiento que al evaluar cualquier parámetro debe tomarse en cuenta en la circunferencia de 10 metros dentro del cuerpo de agua.

El protocolo está compuesto por 13 parámetros a evaluar, los cuales van generando puntuaciones individuales que al ser sumadas y en caso de contar con condiciones excelentes darían un máximo total de 130 puntos, de los cuales se dividen en tres categorías:

- I. Calidad del hábitat ripario
- II. Hidrología
- III. Perturbación antropogénica.

Al final de la evaluación el puntaje total obtenido se relaciona con una tabla de categorías numéricas que expresan a su vez el grado de calidad hidromorfológica del manantial/arroyo.

Existen algunos puntos (el punto 1 y 4) donde hay diferencia en la calificación dependiendo del cuerpo de agua, si es manantial solo se califica en la opción de “Man (Puntaje)”, de forma diferente si es un arroyo, se calificará en las opciones de “Rib. Der. (Puntaje) / Rib. Izq. (Puntaje)” hacienda referencia a los laterales del cauce.

- Datos generales

|                         |                              |        |
|-------------------------|------------------------------|--------|
| Fecha:                  | Nombre de la cuenca:         |        |
| Nombre de evaluador(a): | Localidad:                   |        |
| Georreferenciación:     | Se evalúa en:                |        |
|                         | Manantial                    | Arroyo |
| Altitud:                | Nombre del manantial/arroyo: |        |
| Hora:                   | Geología:                    |        |
| Vegetación nativa:      | Vegetación invasora:         |        |

- Evaluación hidrogeomorfológica.

| Parámetro                                       | Optimo  | Medio  | Malo  | Deficiente  |
|---|---|--|---|---|
| <b>I. CALIDAD DEL HÁBITAT RIPARIO</b>           |   |  |   |   |
| <b>1. Cobertura vegetal (Nativa)</b>            | > 70% de la cobertura vegetal de especies nativas   | 60-40% de cobertura vegetal nativa                                   | 50-30% de cobertura vegetal nativa                              | < 30% de la superficie de cobertura vegetal nativa, parches aislados                        |
| <b>Man. (Puntaje)</b>                           | 10  | 7  | 4   | 1   |
| <b>Rib. Der. (Puntaje)</b>                      | 5   | 3.5  | 2   | 0.5   |
| <b>Rib. Izq. (Puntaje)</b>                      | 5   | 3.5  | 2   | 0.5   |
| <b>2. Estabilidad del flujo base</b>            | <10% del sustrato expuesto  | Entre el 20-40% del sustrato expuesto                                | Entre el 50-80% del sustrato expuesto                           | >80% del sustrato expuesto  |
| <b>Puntaje</b>                                  | 10  | 7  | 4   | 1   |
| <b>3. Perturbación en el sustrato</b>           | <10% del sustrato perturbado  | Entre el 20-40% de sustrato perturbado                               | Entre 50-80% de sustrato perturbado                             | >80% del sustrato perturbado  |
| <b>Puntaje</b>                                  | 10  | 7  | 4   | 1   |
| <b>4. Desarrollo de ganadería y agricultura</b> | Sin presencia de cultivos o zonas ganadera, sin derivaciones para agricultura o ganadería | 20% del suelo para uso agrícola y/o ganadero                         | 50% del suelo para uso agrícola y/o ganadero                    | >80% del suelo para uso agrícola y/o ganadero, presencia de derivaciones para uso doméstico |
| <b>Man. (Puntaje)</b>                           | 10  | 7  | 4   | 1   |
| <b>Rib. Der. (Puntaje)</b>                      | 5   | 3.5  | 2   | 0.5   |
| <b>Rib. Izq. (Puntaje)</b>                      | 5   | 3.5  | 2   | 0.5   |
| <b>II. HIDROLOGÍA</b>                           |   |  |   |   |
| <b>5. Presencia de presas</b>                   | Ausencia de presas  | Presencia de presa con material que permite pasar <50% flujo de agua | Presencia de presa con material que permite pasar <20% de flujo | Presencia de presa con material que no permite el paso del flujo                            |
| <b>Puntaje</b>                                  | 10  | 7  | 4   | 1   |

|   |  |  |   |  |
|---|--|--|---|--|
| <b>6. Alteración del canal</b>  | Ausencia de canalización/tuberías  | Evidencia de canalización/entubamiento en el pasado en menos del 40% del escurrimiento | Canalización/entubamiento extensivo, 40-80% del escurrimiento canalizado e interrumpido       | Banco de ribera con tuberías, cemento o gavión, en 80% de escurrimiento canalizado |
| <b>Puntaje</b>  | 10   | 7  | 4   | 1  |
| <b>7. Presencia de tuberías artesanales</b>                           | Ausencia   |  | Presencia   |  |
| <b>Puntaje</b>  | 10   |  | 0   |  |
| <b>III.PERTURBACIONES ANTROPOGENICAS</b>                              |  |  |   |  |
| <b>8. Efluentes directos al río o manantial por el uso doméstico.</b> | Ausencia   |  | Presencia   |  |
| <b>Puntaje</b>  | 10   |  | 0   |  |
| <b>9. Desarrollo urbano</b>   | Ausencia de asentamientos humanos, carreteras, senderos para uso doméstico | 20% del suelo con presencia de senderos y/o casas de madera o aisladas                 | 50% del suelo con infraestructura como casas de concreto, carreteras                          | >80% del suelo con infraestructura como casas de concreto, carreteras              |
| <b>Puntaje</b>  | 10   | 7  | 4   | 1  |
| <b>10. Desarrollo humano</b>  | Ausencia de actividades humanas  | Al menos una actividad humana: ganadería, agricultura o piscícola                      | Al menos tres actividades humanas: agrícolas, ganadería, piscícola, doméstica (casa/comercio) | Actividades agrícolas, ganadería, piscícola, doméstica (casa/comercio)             |
| <b>Puntaje</b>  | 10   | 7  | 4   | 1  |
| <b>11. Presencia de desechos orgánicos</b>                            | <15% de presencia de materia orgánica nativa                               | Entre 20-40% de presencia de materia orgánica nativa                                   | Entre 50-80% de presencia de materia orgánica   | >90% de presencia de materia orgánica no nativa                                    |
| <b>Puntaje</b>  | 10   | 7  | 4   | 1  |
| <b>12. Presencia de contaminación inorgánica</b>                      | <10% de presencia de basura inorgánica                                     | Entre 20-40% de presencia de basura inorgánica   | Entre 50-80% de presencia de basura inorgánica  | >90% de presencia de basura inorgánica   |
| <b>Puntaje</b>  | 10   | 7  | 4   | 1  |



|                                    |   |  |  |                        |
|------------------------------------|---|--|--|------------------------|
| <b>13. Presencia de protección</b> | Con protección dentro de un área dentro de 4-10 metros, con acceso limitado | Con protección dentro de un área de 4-10 metros con libre acceso | Presencia de protección de concreto en menos de 3 metros alrededor | Ausencia de protección |
| <b>Puntaje</b>                     | 10  | 7  | 4  | 1                      |
| <b>Puntaje total</b>               |   |  |  |                        |

| Calidad Hidromorfológica | Puntaje |
|--------------------------|---------|
| Óptima                   | 130-110 |
| Media                    | 109-80  |
| Mala                     | 79-50   |
| Deficiente               | <50     |