

**UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

Informe Escrito Final

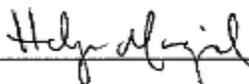
**Caracterización de la calidad del agua superficial en las subcuencas Quebrada Honda
y Chiz-Maravilla, Cartago Costa Rica.**

**Proyecto de graduación presentado como requisito parcial para optar por el grado de
Licenciatura en Biología con Énfasis en Manejo de Recursos Naturales.**

**Jorge Ernesto Alfaro Arrieta
401900801**

**Campus Omar Dengo
Heredia, 2019**

Este trabajo de graduación fue aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales



M.Sc. Helga Madrigal Solís (quién preside)

Sustituye al Decano de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



Licda. Hannia Vega Bolaños

Sustituye a la Directora de la Escuela de Ciencias Biológicas



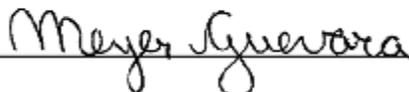
M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez

Tutora



M.Sc. Carola Scholz

Asesora



Dr. Meyer Guevara Mora

Invitado especial

Resumen

Costa Rica es un país con una amplia red hídrica, sin embargo, en sus aguas superficiales, ríos y quebradas se presentan procesos de contaminación que afectan la calidad del agua y el ecosistema ribereño. Altos niveles de contaminación en los ríos son la consecuencia de mal manejo de desechos, vertidos de aguas residuales y divergencias en el uso de suelo. Un ejemplo, es la cuenca del Río Chiz-Maravilla y Quebrada Honda, donde prevalece el uso intensivo de insumos agrícolas que ha afectado las aguas de sus ríos y quebradas. Se determinó el grado de contaminación en la cuenca Río Chiz-Maravilla y Quebrada Honda por medio de la evaluación de la calidad del agua de la subcuenca utilizando análisis fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos. Se utilizaron los tres tipos de análisis en diez diferentes puntos de muestreo para medir el impacto de la contaminación y, a través de distintos Índices de Calidad del Agua los niveles de contaminación en los ríos, además se compararon con los distintos usos de suelo que se da a los márgenes de estos. Se obtuvieron niveles de contaminación altos según los resultados fisicoquímicos, coincidiendo con los análisis microbiológicos que mostraron elevados niveles de coliformes fecales y coincidiendo también con los resultados biológicos en donde se obtuvieron 2517 individuos de macroinvertebrados bentónicos representados en 12 ordenes diferentes, entre ellos, el de mayor abundancia fue el orden Diptera con la familia Chironomidae que se presentó a lo largo de la subcuenca, indicando altos niveles de contaminación. Los distintos índices aplicados indican que la calidad del Río Chiz, el Río Maravilla y Quebrada Honda es mala y pueden estar relacionados a los usos de suelo en la zona, por lo que es necesaria la implementación de medidas de gestión que permitan disminuir la contaminación y la recuperación de los ríos.

Palabras Claves: Costa Rica, Subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Calidad de Agua, Macroinvertebrados bentónicos, Coliformes Fecales.

Agradecimiento

A mi familia por toda la ayuda brindada durante este proceso.

A todos mis compañeros del Laboratorio Nacional de Aguas, por su apoyo tanto técnico como emocional.

A Meyer Guevara por sus importantes aportes en la investigación, a Christian Núñez y los que me acompañaron a realizar los muestreos, a Geannina Moraga y todo el Laboratorio de Hidrología Ambiental de la UNA, por su ayuda y por permitirme participar en uno de sus proyectos.

A las lectoras Carmen Valiente por su respaldo incondicional desde el primer día, a la profesora Carola Scholz que siempre tuvo palabras de motivación y buenos consejos; y un agradecimiento especial a la profesora y tutora Alicia Fonseca, por todo su tiempo y apoyo, quien a través de ésta aventura pasó de ser profesora a tutora, para finalizar como amiga.

Gracias a todos los que de alguna manera fueron parte de este proyecto.

Dedicatoria

A Cindy, Felipe y Alejandro. Son la razón de este documento.

Índice

Miembros del Tribunal.....	I
Resumen.....	II
Agradecimientos.....	III
Dedicatoria.....	IV
Índice.....	V
Índice de Cuadros.....	VI
Índice de Figuras.....	VII
Abreviaturas.....	VIII
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Justificación.....	7
1.3. Objetivos.....	10
1.3.1. Objetivo General.....	10
1.3.2. Objetivos Específicos.....	10
2. Metodología.....	10
2.1. Sitio de Estudio.....	10
2.2. Selección de Sitios de Muestreo.....	11
2.3. Muestreo y Análisis Biológico.....	13
2.4. Muestreo y Análisis Microbiológicos.....	14
2.5. Muestreo y Análisis Físicoquímicos.....	15
2.6. Determinación de usos de suelo en las zonas de protección de los ríos.....	16
2.7. Análisis de Datos.....	16
3. Resultados y Discusión.....	19
3.1. Resultados de los Análisis Biológicos.....	19
3.2. Resultados Microbiológicos.....	25
3.3. Resultados Físicoquímicos.....	27
3.4. Resultados de Uso de Suelo.....	35
4. Conclusiones.....	40
5. Recomendaciones.....	42
6. Bibliografía.....	43

Índice de Cuadros

Cuadro 1	Características de los puntos de muestreo en la subcuenca de los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.....	13
Cuadro 2	Análisis fisicoquímico y métodos de referencia realizados a las muestras recolectadas en los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.....	15
Cuadro 3	Clasificación de calidad del agua superficial según el BMWP-CR adaptado para Costa Rica según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales 33903-MINAE-S 2007.....	17
Cuadro 4	Clasificación de la calidad del agua según el WQI.....	17
Cuadro 5	Clasificación de la calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales 33903-MINAE-S 2007.....	18
Cuadro 6	Resultados Obtenidos del muestreo biológico de macroinvertebrados bentónicos en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	21
Cuadro 7	Resultados del Índice de Similitud de Jaccard para cada punto de muestreo en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	23
Cuadro 8	Resultados obtenidos del Índice BMWP-CR para cada punto de muestreo en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	24
Cuadro 9	Resultados microbiológicos obtenidos para cada punto, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	26
Cuadro 10	Resultados Fisicoquímicos obtenidos para cada punto, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	28
Cuadro 11	Resultados del Índice Water Quality Index (WQI) para cada punto, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago Costa Rica.....	31
Cuadro 12	Resultados Obtenidos del Índice Holandés de Valoración de la Calidad para cada punto, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	33
Cuadro 13	Uso de suelo para cada margen del Río Chiz, Maravilla y Quebrada Honda.....	36

Índice de Figuras

Figura 1	Ubicación de la zona de estudio, subcuencas de los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.....	11
Figura 2	Sitios de muestreo en la subcuenca de los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.....	12
Figura 3	Resultados del Índice de Diversidad de Margalef e Índice de Equidad de Shannon-Wiener, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	22
Figura 4	Análisis de componentes principales obtenidos en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	34
Figura 5	Uso de Suelo en comparación con el BMWP-CR en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	37
Figura 6	Uso de Suelo en comparación con el Índice Holandés en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	38
Figura 7	Uso de Suelo en comparación con el WQI en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.....	39

Abreviaturas

AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
BMWP-CR	Biological Monitoring Working Party adaptado para Costa Rica
CNE	Comisión Nacional de Emergencias
COMCURE	Comisión para el Ordenamiento y Manejo de Cuenca del Río Reventazón
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
LNA	Laboratorio Nacional de Aguas
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica
NMP	Número más Probable
PSO	Porcentaje de Saturación de Oxígeno
SMEWW	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
WQI	Water Quality Index
µg/L	Microgramo por Litro
mg/L	Miligramo por Litro
NA	No Aplica
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
pH	Potencial de Hidrógeno
SAAM	Sustancias Activas al Azul de metileno

1. Introducción

El agua es el recurso de mayor importancia para el desarrollo de la vida en el planeta, es indispensable para la subsistencia, ya que es el constituyente principal de todos los organismos vivos, permite el establecimiento de diversos ecosistemas, asimismo participa en muchas actividades metabólicas, biológicas y naturales, entre otras (Bolaños *et al.* 2015).

Costa Rica es un país con un valioso recurso hídrico, influenciado por la topografía y la posición geográfica que provocan altos niveles de precipitación a lo largo del año, los cuales influyen directamente en la cantidad de agua que fluye por los ríos y en la cantidad que se escurre o se infiltra, provocando aumentos en los niveles de agua subterránea y agua superficial (Montero-Sánchez *et al.* 2016).

El agua superficial se encuentra sobre la tierra, ya sea en reposo o circulando en diferentes formas, tanto naturales como artificiales (Jiménez y Vélez 2006). Estas aguas son las provenientes de las precipitaciones, que no se infiltran ni regresan a la atmósfera por evaporación, proviniendo de manantiales o nacimientos que se originan de las aguas subterráneas y logran estar fluyendo constantemente, como los ríos o estar en reposo como los lagos y lagunas (Martínez-Bastida *et al.* 2007).

La calidad del agua superficial puede variar espacial y temporalmente, en función de los procesos morfológicos, hidrológicos, químicos, biológicos y sedimentológicos naturales (Mora-Alvarado y Portuguese-Barquero 2018). Es importante proteger el agua ya que, según Peña (2017) cualquier probabilidad que altere la calidad del agua de una fuente superficial es una amenaza porque puede acrecentar las cargas de contaminación. De igual modo, se aminora la capacidad natural de autodepuración del sistema hídrico que las recibe, lo cual ocasiona la pérdida de las cualidades para sus usos específicos y altera la calidad de los beneficios ambientales propios de estos sistemas hídricos.

Según Santana y Mejía (2010) el uso constante del agua es una necesidad del ser humano y esto ha provocado que grandes masas de aguas se contaminen diariamente, como consecuencia, se disminuyen la calidad y la cantidad de agua disponible para el consumo humano. Este fenómeno, asociado al crecimiento desordenado de la población se convierte

en un gran problema que cada día se va agravando (Mora y Portuguez 2011) y existen pocas medidas de contención y de mitigación encausadas a reducir los impactos sobre el agua producidos por esta causa (Bolaños *et al.* 2015).

Bolaños *et al.* (2015) indican que la contaminación de agua superficial consiste en una gran concentración de agentes, sustancias y desechos que provocan ciertos efectos en la calidad en un tiempo determinado. Existen dos tipos de contaminación, uno es la contaminación puntual que se refiere a sitios específicos de descarga de contaminantes sobre el cuerpo de agua, por ejemplo, deposiciones de aguas negras provenientes de hogares o aguas industriales que sean depositadas directamente sobre el cuerpo de agua (Hernández *et al.* 2015).

El segundo tipo es la llamada contaminación difusa, la cual comprende una carga que contribuye a la contaminación en el agua superficial y está relacionada en forma directa con fertilizantes o pesticidas mayormente. Por lo tanto, este tipo de contaminación se relaciona a menudo con las actividades agrícolas y, más aún, con aquellas que no son controladas con respecto al medio ambiente y provocan un deterioro en la calidad del agua (Marroquín 2013).

Una forma de determinar el deterioro del agua o proceso de contaminación es por medio de la utilización de indicadores o índices de calidad de agua, que están relacionados estrechamente con los parámetros de calidad de agua, ya sea por la combinación de algunos de ellos por medio de fórmulas o mediante un valor numérico que se relaciona con una calidad de agua determinada (Şener *et al.* 2017).

De acuerdo con Fernández *et al.* (2008) un índice de calidad del agua es una expresión numérica de variables fisicoquímicas y microbiológicas, que se representan con símbolos o colores. Por su parte, para Torres (2009) un índice establece la calidad biológica de agua representada en forma de valor numérico, sintetizando las características de las especies presentes en una muestra. Según Arango *et al.* (2008) en la evaluación de la calidad biológica del agua considera como ecosistema sano, aquellos criterios que se relacionan con un alto nivel de diversidad, productibilidad y habitabilidad.

El índice biológico, por ejemplo, presenta distintos indicadores biológicos o bioindicadores, son definidos como una especie, población o comunidad. Estos presentan requerimientos específicos en relación con un conjunto de variables físicas o químicas

conocidas. Por lo tanto, la ausencia o los cambios en número de individuos, su forma, fisiología o manera de comportarse indican que las variables fisicoquímicas dadas se salen de sus límites preferidos; es decir, un bioindicador ideal tiene tolerancias ambientales estrechas, se encuentra invariablemente en un ecosistema de características definidas y cuando su población presenta un porcentaje mayor o similar al resto de los organismos del mismo hábitat (Springer 2010). Por el contrario, se consideran pobres indicadores de calidad ambiental aquellos organismos o poblaciones con tolerancias amplias para diferentes condiciones ambientales, cuyos patrones de distribución y abundancia se ven poco afectados ante las variaciones del hábitat (Meza-S *et al.* 2012).

Si a los estudios biológicos se suman una serie de análisis fisicoquímicos y microbiológicos se podrá, con certeza, diagnosticar el verdadero estado del ecosistema (Uribe y Roldán 1975, Ramos-Merchante y Prenda 2017) y, efectivamente debido a esto, es trascendental el reconocimiento del valor que posee la bioindicación como un método para evaluar la calidad del agua.

Por otro lado, las contaminaciones de los cuerpos naturales de aguas superficiales degradan la calidad del recurso por diversas actividades de origen antropogénico, por ejemplo, la acumulación de aguas negras o residuales y de residuos industriales, despeje de tierras, deforestación, uso de pesticidas, minería y obras hidroeléctricas (Mora y Portugués 2011). Esto acarreará muchas consecuencias, tanto para las poblaciones humanas como para los ecosistemas naturales debido a la excesiva polución del agua y a la gran demanda del recurso que no llega a satisfacer las necesidades de la población, por lo tanto, es vital que el agua cuente con la calidad necesaria para su demanda (Saravanakumar y Kumar 2011; Marín 2012).

En Costa Rica, según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales, establecido por el Decreto Ejecutivo N° 33903-MINAE-S (MINAE 2007) y el libro de Métodos Estandarizados para la Examinación de Agua y Agua Residual (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) (Eaton *et al.* 2017) se deben tomar en cuenta parámetros fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos para la determinación de la calidad del agua. La utilización de dichos parámetros permite realizar un monitoreo del agua, que puede generar información válida para conocer el grado de contaminación presente en el cuerpo de agua superficial (Meza-S *et al.* 2012). Además,

se genera un precedente para desarrollar programas de conservación, protección, ordenamiento territorial y manejo de las áreas de drenaje. Así, el empleo de bioindicadores, en conjunto con los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos representa una herramienta de valiosa utilidad para determinar la calidad del agua en el curso fluvial, y ejecutar las medidas de mitigación necesarias con base en la información obtenida.

En consecuencia, es muy importante reconocer la calidad con base en concentraciones de agentes contaminantes presentes en estas aguas y, por medio de esto, lograr medir el impacto de las distintas actividades humanas que se realicen sobre las diferentes partes del cuerpo de agua (Mora-Alvarado y Portuguez-Barquero 2018) ya que la protección de los recursos hídricos trae un beneficio significativo a los ecosistemas y, por lo tanto, en la salud humana como parte de una serie de medidas de conservación propias del desarrollo sostenible del país. Igualmente, la recuperación y conservación de las características fisicoquímicas y biológicas de los cuerpos superficiales de agua son fundamentales, con el propósito de que estas aguas puedan ser usadas para diferentes fines sociales, económicos y ambientales garantizando una mejor calidad de vida para los habitantes de una región (Rosas-Acevedo *et al.* 2014).

1.1 Antecedentes

Los estudios realizados sobre los distintos cursos fluviales dividen el país en 34 cuencas hidrográficas considerando su heterogénea orografía y dependiendo de la zona geográfica donde se ubiquen (Astorga 2015). No obstante, estudios de calidad del agua realizados por Hernández *et al.* (2011) demuestran que gran cantidad de las áreas con cursos fluviales, así como las zonas de recarga acuífera, se ven afectadas por las actividades de producción, contaminación y por la carencia de una adecuada política de manejo que concuerde con la protección del agua y de los recursos naturales.

Análisis realizados por Reyes-Morales y Springer (2014), comprueban que cuando se utiliza el recurso hídrico como base del desarrollo se provoca un impacto negativo e incide en forma directa en la cantidad y en la calidad del recurso. Además, las diferentes actividades económicas generan impactos ambientales a expensas del recurso hídrico, conduciendo inevitablemente a la pérdida de su productividad y de su uso inmediato al disminuir su calidad.

La forma en que se utiliza la tierra, el problema de la deforestación, el mal ordenamiento territorial y una inadecuada gestión ambiental, tanto en los sectores productivos como en las áreas urbanas, provocan diferentes niveles de contaminación en la mayoría de las cuencas, subcuencas y áreas de recarga (Rosas-Acevedo *et al.* 2014). Esto concuerda con Angulo (2015), quien expone que la contaminación de los ríos es uno de los problemas más grandes del país, ya que sus aguas son usadas para consumo humano y otras actividades como la agricultura, la piscicultura y la ganadería, entre otras.

Los contaminantes del agua pueden evaluarse a través de distintos parámetros, Rincón *et al.* (2011) y Pulido *et al.* (2015) han definido y demostrado la importancia de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, respectivamente, en cuanto a la calidad del agua, pues permiten evaluar el impacto ambiental que generan las diferentes intervenciones antrópicas, ambos parámetros definidos para nuestro país por el Decreto Ejecutivo n° 33903-MINAE-S (MINAE 2007).

Sin embargo, la contaminación de los sistemas acuáticos modifica y alteran la fisicoquímica del agua y esto influye en la composición, distribución y estructura de las comunidades que pueden ser utilizadas como indicadores biológicos del agua (Uribe y Roldán, 1975). En Latinoamérica se ha demostrado que, el estudio de parámetros biológicos en conjunto con parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, permite una visión más amplia y correcta para la determinación de la calidad del agua (Figueroa *et al.* 2003, Álvarez *et al.* 2008, Zhen-Wu *et al.* 2009). Estos parámetros han permitido exponer cambios en la calidad del agua entre épocas demostrando deterioro progresivo de ecosistemas producto de la actividad humana (Sánchez *et al.* 2010, Segnini 2003).

Estudios realizados por el Laboratorio Nacional de Aguas (Mora 2004, Mora-Alvarado y Portuguez- Barquero 2018), demuestran que las aguas superficiales en Costa Rica presentan una contaminación fecal orgánica, típica de un país en vías de desarrollo y consideran que la descarga de aguas residuales domésticas sin tratamiento depositadas en los cuerpos de agua son la principal causa de la contaminación orgánica; por lo tanto, es necesario implementar la recolección, conducción y análisis de las aguas en las principales áreas urbanas y rurales del país. Esto se respalda por distintos estudios publicados por el Estado de la Nación (Astorga 2015; Ángulo 2015) en donde se demostró, a partir de

análisis fisicoquímicos y microbiológicos, la contaminación en el agua superficial en diferentes quebradas del país por origen antropogénico.

En nuestro país, los análisis de calidad del agua realizados por Brenes y Molina (2007 y 2012) en la cuenca del río Tárcoles y Reventazón a través del estudio de cuatro ríos del área metropolitana y por Bolaños *et al.* (2015) en la quebrada San Ramón, han demostrado que la calidad de los ríos de nuestro país varía según la época y la densidad de la población. Por lo tanto, es necesario realizar monitoreos que tomen en cuenta éstos parámetros sobre los distintos cuerpos de agua a nivel nacional.

La aplicación de índices biológicos para la determinación de la calidad del agua en nuestros ríos han sido aplicados por Peinador (2004), quien establece que la adecuada utilización de los organismos bénticos para valorar la calidad del agua de un río es una herramienta útil, que permitirá hacer más sencilla y rápida la valoración de la calidad de agua de los ríos; de tal forma que ayudará a conocer el estado actual de los ríos así como de las quebradas de Costa Rica permitiendo a establecer programas de vigilancia en nuestras cuencas hidrográficas.

De igual manera, Quirós (2011) y Springer (2010) han demostrado que los resultados de la utilización de macroinvertebrados bentónicos para la calidad del agua superficiales en conjunto con parámetros fisicoquímicos como microbiológicos constituyen los parámetros ideales para la determinación de la calidad de las aguas, y por lo tanto, la identificación de contaminantes en el agua que actualmente se constituye como uno de los problemas principales de nuestros ríos.

Esta problemática se sigue manifestando con el pasar de los años, ya que según Angulo (2015) en el Vigésimo Segundo Informe Estado de La Nación en Desarrollo Humano Sostenible apenas un 76,6% de la población abastecida se somete a programas de control de calidad que no se realizan de manera sistemática; es decir, las empresas que ofrecen el servicio utilizan periodos de control bianuales, anuales, semestrales o más frecuentes que varían según el número de personas abastecidas (Astorga 2015). Los acueductos comunales tienen menos control en la calidad abastecida, debido a que no poseen sistemas de tratamiento de aguas ni desinfección (Mora 2004).

Esto concuerda con estudios previos realizados por la Comisión Nacional de Emergencias (CNE 2014) durante el año 2014 en la zona de Juan Viñas, los cuales han

demostrado que existe un gran problema en la contaminación de los ríos debido al desordenado crecimiento urbano y a la falta de educación ambiental. Así como lo menciona Cruz *et al.* (2000) quienes propusieron un estudio de los análisis de calidad del agua en la zona debido al mal estado de los acueductos, la mala calidad y vulnerabilidad de las nacientes en el área y lo expuesto por Zhen-Wu *et al.* (2009) que a través del conjunto de análisis e índices para la valoración de la calidad de agua se permitió realizar planes de mitigación sobre la Quebrada Victoria en Costa Rica.

1.2 Justificación

El cantón de Jiménez es el cuarto de la provincia de Cartago y está conformado por tres distritos: Juan Viñas (central), Tucurrique y Pejibaye (Jiménez 2010). La zona cuenta con una red hídrica muy densa, y para su mayor provecho, el establecimiento de los poblados ha sido en márgenes de ríos de importantes características para la población desde tiempos de la colonia, debido a que algunos son utilizados para la industria cañera, cafetalera, agrícola de hortalizas y otros como fuentes de agua potable (Cruz *et al.* 2000).

Los ríos Maravilla, su tributario Río Chiz y la Quebrada Honda, son límites cantonales y, según Cruz *et al.* (2000) son de tipo permanente, ya que mantienen un volumen de agua constante durante todo el año, aunque en algunos casos los ríos Maravilla, Taus y las Vueltas en periodos de escasas lluvias en el año pueden disminuir su caudal considerablemente y se ve afectada su calidad (Mora 2004).

Según Jiménez (2010) la gestión del recurso hídrico en el cantón de Jiménez actualmente, es limitada y la incorrecta administración del territorio amenaza el futuro próximo. A pesar de lo estipulado por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) en la Política Nacional de Agua Potable de Costa Rica 2017-2030 (2016), en la utilización del agua para consumo, donde dispone la forma como debe ser manipulada y gestionada, para el uso correcto por parte de los administradores de los acueductos a nivel de todo el país, la gestión del recurso hídrico no se realiza de la mejor manera en esta zona.

La protección de las nacientes y zonas de recarga acuífera no han sido integradas en las agendas de los administradores; por esa razón, la calidad y cantidad de las aguas

pertenecientes a esta subcuenca se encuentra prácticamente sin control (Astorga 2015). Hay dos factores principales que evitan la protección de estas zonas: primero, limitación de información por parte de los administradores para gestionar la protección de estas áreas, así como el bajo presupuesto asignado. Segundo, la localización de las nacientes y zonas de recarga acuífera en propiedad privada, lo cual limita la gestión de estas zonas para convertirlas en áreas protegidas, por cuanto existen convenios verbales con los propietarios para preservar estas áreas sin compromiso legal que garantice el acuerdo (Jiménez 2010).

Existen algunas iniciativas ambientales que se han implementado en la microcuenca desde diversas instituciones estatales, con el fin de revertir y prevenir efectos negativos sobre el ecosistema, como la Comisión para el Ordenamiento y Manejo de Cuenca del Río Reventazón (COMCURE) creada en el año de 2000. Sus objetivos se enfocan en coordinar con las instituciones sociales en aspectos agrosilvopecuarios, manejo de cobertura forestal y actividades de educación ambiental, así como incentivar proyectos sostenibles, que beneficien el desarrollo de las comunidades y la conservación de la cuenca enfocada en la preservación del recurso hídrico (COMCURE 2015). Otra de las iniciativas ambientales es la implementación de un modelo de gestión integrada de los residuos sólidos domiciliarios en el distrito de Juan Viñas, proyecto que comenzó a plantearse en el año 2004 y que actualmente le da un adecuado manejo al 90% de los residuos del lugar (Jiménez 2010).

La amenaza y el deterioro, debido a los usos de la tierra en esta microcuenca, sobre los recursos naturales son sumamente altos. Este deterioro ambiental es por la falta de manejo de las aguas negras, que son depositadas directamente en los cuerpos de agua (Mora 2004), además, existe la amenaza de la descarga de aguas de tipo agrícola, que son un agente contaminante de gran impacto sobre los ríos, ya que dentro de la microcuenca se localicen un ingenio de caña y un beneficio de café. Sumado a lo anterior, en la cuenca existe una problemática asociada al mal manejo de los productos químicos agrícolas, debido al sobreuso de herbicidas, principalmente, así como, el exceso en el uso de fertilizantes nitrogenados. En la actualidad, las zonas de recarga acuífera no están identificadas; esto permite actividades agrícolas donde no deberían ejecutarse, ya que el desconocimiento de las zonas impide la formulación de regulaciones de las actividades en estas áreas (CNE 2014).

Determinar la calidad del agua en la cuenca es importante, porque los resultados permitirán generar información sobre el estado actual de la calidad del agua y generar recomendaciones que permitan beneficios tanto sobre la salud ambiental, así como en la salud humana, debido a que los ríos son utilizados por la comunidad para diferentes actividades, en las cuales entran en contacto directo con el río. No obstante, el agua se encuentra mezclada con las descargas que se están vertiendo; en consecuencia, si las descargas están provocando un efecto negativo en el río, inminentemente la comunidad se ve afectada (Fonseca *et al.* 2018).

De igual modo, los resultados tendrán beneficios sobre la salud ambiental, ya que demostrarán si los valores de las descargas que están llegando a los ríos se encuentran dentro de los recomendados según las normativas vigentes. Esto permitirá que, en caso de que sobrepasen los límites, se puedan tomar medidas que permitan una regulación sobre los impactos en los cuerpos de agua para reducir la contaminación y lograr una posible recuperación del río.

Por estas razones, el objetivo de la presente investigación es realizar los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos necesarios para caracterizar la calidad de agua de los ríos de esta zona y así determinar el estado de conservación para proponer a las autoridades encargadas, medidas de mitigación en cuanto al manejo y protección que permitirá mejorar el estado de la cuenca. Asimismo, suministrará información para educar a la comunidad en el uso adecuado de las aguas, alcanzando generar beneficios en la salud de las comunidades que tienen un contacto directo con los ríos Chiz, Maravilla y Quebrada Honda, así también beneficios en el ambiente y los ecosistemas presentes que son los principales afectados.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la calidad del agua superficial en la subcuenca Quebrada Honda y Chiz-Maravilla, Cartago utilizando indicadores de calidad físicos, químicos y biológicos, como insumos para la caracterización ambiental de la subcuenca.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Calcular la calidad del agua por medio de índices biológicos en la subcuenca Quebrada Honda y Chiz-Maravilla.
- Conocer la calidad del agua por medio del análisis de parámetros fisicoquímicos en la subcuenca Quebrada Honda y Chiz-Maravilla.
- Determinar el uso del suelo de las zonas de protección a partir de la información recopilada de los ríos de la subcuenca Quebrada Honda y Chiz-Maravilla para dar recomendaciones de protección y manejo de estas zonas.

2. Metodología

2.1. Sitio de estudio

La subcuenca Quebrada Honda y Chiz-Maravilla se localiza en la vertiente del Caribe de Costa Rica, al norte de la provincia de Cartago. La subcuenca posee una extensión aproximada de 47 Km² entre las coordenadas geográficas 83°47'30" - 83°40'00" latitud norte y 9°52'30" - 9°50'00" longitud oeste, y entre las coordenadas 534 000 m este y 1 098 000m norte del sistema de Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica del 2015 (CRTM05) (Figura 1). Posee tres afluentes principales: Quebrada Honda, Maravilla y

Chiz. En la zona se localizan tres asentamientos principales, Capellades, Juan Viñas y Murcia, los cuales pertenecen a los cantones cartagineses de Alvarado, Jiménez y Turrialba, respectivamente.

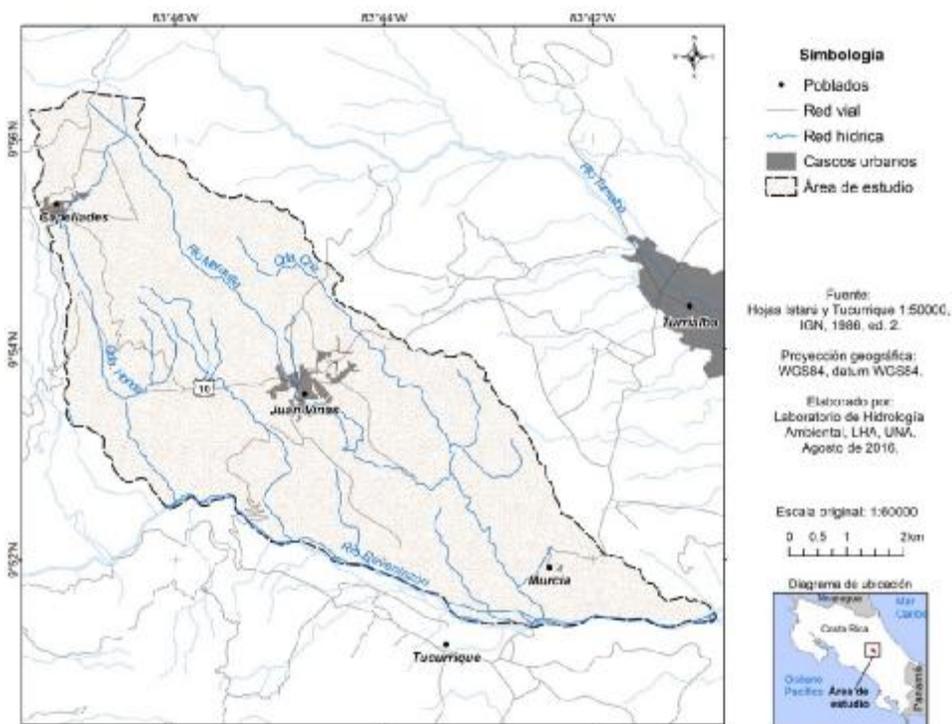


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio, subcuencas de los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.

La zona no mantiene un clima definido durante la época seca, porque en los meses de poca precipitación, se dan lluvias que van desde los 100 mm a 200 mm. En época seca de diciembre a abril, se da una disminución en la cantidad de lluvia en el territorio y aumenta en época lluviosa de mayo a noviembre. Entre estos dos períodos se dan las transiciones entre ambas épocas (IMN, 2013). En cuanto a la temperatura, la máxima de la zona es de 31,4°C y mínima de 21,2 °C, mientras que la precipitación promedio anual es de 4500 mm-2700 mm (IMN, 2008).

2.2. Selección de Sitios de Muestreo

Se realizó una delimitación de la cuenca en partes alta, media y baja, según criterios previamente establecidos de uso de suelo, altitud, densidad poblacional, cobertura boscosa

y zonas de protección (Fig. 2). Se seleccionaron sitios de muestreo en cada sección (Cuadro 1), para la parte alta de la cuenca se establecieron dos puntos de muestreo que pertenecen al Río Maravilla y a la Quebrada Honda, en la parte media de la cuenca dos sitios en la Quebrada Honda, tres sitios en el río Maravilla ya que es el afluente principal de la cuenca y el que presenta mayor cantidad de cauce dentro del mayor poblado de la zona y uno para el río Chiz. La parte baja fue representada con un punto de muestreo perteneciente al Río Chiz en el cual convergen todos los ríos de la cuenca, el acceso a la parte baja no fue posible para el Maravilla y el Quebrada Honda debido a la falta de caminos y las pendientes pronunciadas.

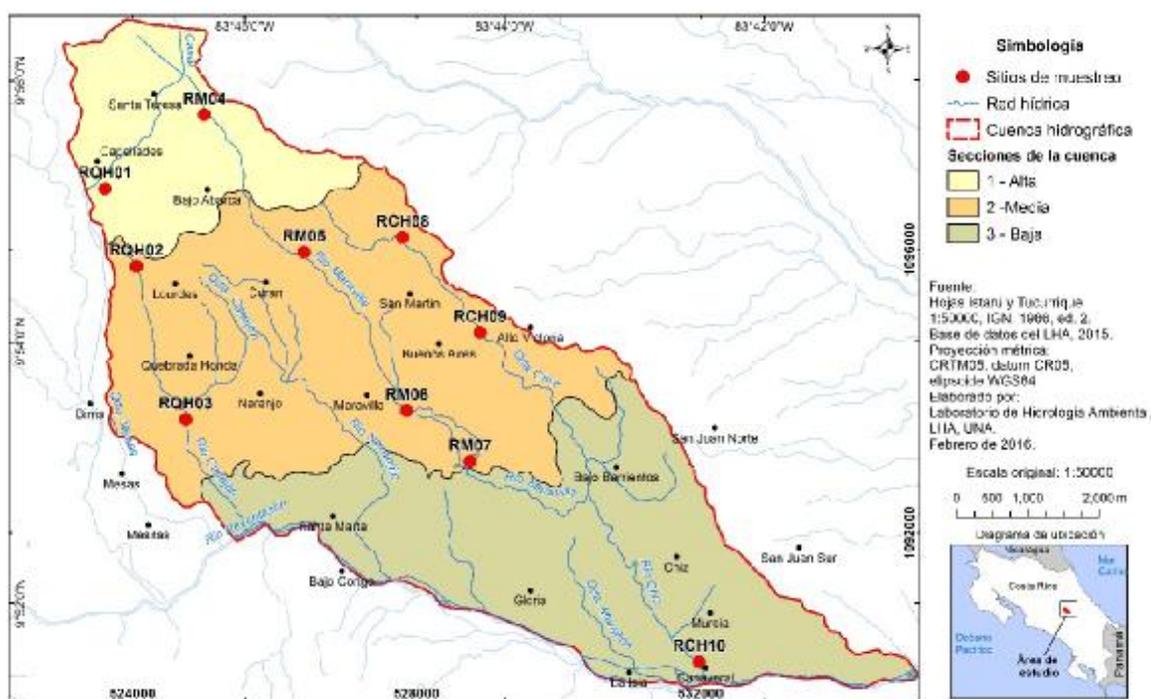


Figura 2. Sitios de muestreo en la subcuenca de los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.

Se realizaron cuatro muestreos en diferentes épocas para determinar la calidad del agua en los puntos seleccionados, específicamente uno en época lluviosa, dos en época de transición y uno en época seca entre mayo del 2016 y marzo del 2017. En cada uno de los 10 sitios se tomaron muestras de macroinvertebrados bentónicos para el análisis biológico y

muestras de agua superficial para determinar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Todas las muestras fueron analizadas en el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA).

Cuadro 1. Características de los puntos de muestreo en la subcuenca de los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.

Punto de muestreo	Coordenadas sistema CRTM 05 oeste	Coordenadas sistema CRTM 05 norte	Elevación (msnm)	Ubicación en el Río
RQH01	523616	1096850	1611	Quebrada Honda. Parte alta de la cuenca.
RM04	525015	1097892	1640	Río Maravilla. Parte alta de la cuenca.
RQH02	524059	1095761	1401	Quebrada Honda. Parte media de la cuenca. Zona Boscosa.
RQH03	524752	1093597	1020	Quebrada Honda. Parte media de la cuenca. Zona Urbana.
RM05	526417	1095961	1371	Río Maravilla. Parte media de la cuenca. Zona Boscosa.
RCH08	527806	1096168	1279	Río Chiz. Parte media de la cuenca. Zona Boscosa.
RM06	527860	1093720	1137	Río Maravilla. Parte media de la cuenca. Zona Urbana.
RM07	528758	1093004	1095	Río Maravilla. Parte media de la cuenca. Zona Urbana
RCH09	528900	1094831	1178	Río Chiz. Parte media de la cuenca. Zona Urbana.
RCH10	531983	1090187	656	Río Chiz. Parte baja de la cuenca.

Elaboración propia.

2.3. Muestreo y Análisis Biológico

La toma de muestras biológicas se llevó a cabo de acuerdo con el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales establecido por el Decreto Ejecutivo N° 33903-MINAE-S publicado en La Gaceta en el año 2007. Se consideraron como parámetros la presencia y abundancia de macroinvertebrados bentónicos.

El muestreo de macroinvertebrados se realizó utilizando una red tipo D con malla de 500 μm y con una apertura de 25 cm. Se tomó una muestra compuesta de tres submuestras,

cada una recolectada en un tiempo de 5 minutos desplazando la red en los diferentes microhábitats identificados en cada punto. La muestra se depositó en bolsas plásticas con alcohol de 96 °.

Las muestras de macroinvertebrados fueron procesadas en el LNA siguiendo la metodología del índice BMWP-CR (Biological Monitoring Working Party adaptado para Costa Rica) para la determinación de la calidad del agua, que se basa en la presencia de familias de macroinvertebrados bentónicos mencionadas en el apéndice III del Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales N33903-MINAE-S; asignándoles un valor de acuerdo a su tolerancia independientemente de la cantidad de individuos colectados.

Para el análisis e identificación de las muestras de organismos acuáticos se siguió la metodología establecida en la última edición de los “Rapid Bioassessment Methodology For Rivers and Streams” de la Agencia de Protección Ambiental (EPA 2003) de los Estados Unidos de América, así como la Guía para el Estudio de los Macroinvertebrados Acuáticos del Departamento de Antioquia creada por Roldán (1995) y la guía taxonómica para Macroinvertebrados de Agua Dulce de Costa Rica (Springer *et al.* 2010).

2.4. Muestreo y Análisis Microbiológicos

La toma de muestras microbiológicas y sus respectivos análisis se llevaron a cabo según lo establecido en el libro de Métodos Estandarizados para la Examinación de Agua y Agua Residual (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) (Eaton *et al.* 2017).

Las muestras para los análisis microbiológicos se tomaron en botellas de vidrio de 100 mL previamente esterilizadas. Se llenó la botella dejando una burbuja de aire que permitiera poder agitar la muestra. Se depositó en un recipiente con hielo para su traslado y posterior análisis.

Los análisis microbiológicos se realizaron en el Laboratorio Nacional de Aguas de AyA en menos de 24 horas desde su recolecta. Se determinó la concentración de coliformes fecales a través de la técnica de Número más Probable (NMP) en tubos múltiples (9221E. Eaton *et al.* 2017).

2.5. Muestreo y Análisis Físicoquímicos

La toma de muestras físicoquímicas y sus respectivos análisis se realizaron de acuerdo con lo establecido en el libro de Métodos Estandarizados para la Examinación de Agua y Agua Residual (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) (Eaton *et al.* 2017). Se midieron parámetros *in situ* y en laboratorio. Para la medición de parámetros *in situ* se utilizó un equipo multiparámetro Multi 2430 WTW para determinar el oxígeno disuelto (mg/L) y el porcentaje de saturación de oxígeno (PSO) y con un equipo multiparámetro Hanna HI9813-3 se midió la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y el pH.

La toma de muestras se realizó con botellas de plástico de alta densidad previamente lavadas; estas se mantuvieron en refrigeración durante el transporte y fueron analizadas en el Laboratorio Nacional de Aguas del AyA, en donde se realizaron los análisis mostrados en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Análisis físicoquímico y métodos de referencia realizados a las muestras recolectadas en los ríos Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica.

Análisis	Método de referencia (SMEWW)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	5220D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	5210B
Nitrógeno Amoniacal	4500 NH3 A
Nitratos	4500 - NO3 E
Turbiedad	2130B
Fluoruros	4500F C
Color	2120D
Grasas y Aceites	5520 B
Sólidos Disueltos	2540 D
Sólidos Suspendidos Totales	2540 B
SAAM	5540 C
Metales Pesados (boro, arsénico, cadmio, cianuro, cloruros, cobre, cromo, sulfatos, hierro, magnesio, mercurio, níquel, nitritos, plomo, selenio, sulfatos)	3125 B

Elaboración propia

2.6. Determinación de usos de suelo en las zonas de protección de los ríos

Se estipularon los diferentes usos de suelo en las zonas de protección de los tres ríos principales, a partir de los lineamientos de la Ley Forestal 7575 (MINAE 1996), la cual decreta en el artículo 33 sobre áreas de protección de ríos: “Una franja de quince metros en zona rural y de diez metros en zona urbana, medidas horizontalmente a ambos lados, en las riberas de los ríos, quebradas o arroyos, si el terreno es plano y de cincuenta metros horizontales si el terreno es quebrado”.

Se determinó el uso de suelo en las zonas mencionadas, con el método de fotointerpretación de imágenes, para esto se utilizó información generada por el Laboratorio de Hidrología Ambiental del 2016, a partir de imágenes satelitales Quick Bird II de marzo de 2015 a una resolución de 0.6 m extraída de la aplicación Google Pro y los datos compilados durante los muestreos en los cuales se realizó la comprobación de campo correspondiente. La fotointerpretación, se realizó según la metodología descrita por Fernández (2000), con base en imágenes ortorectificadas World View II del año 2016 sobre la imagen se realizó una digitalización de usos de la tierra a escala 1:5,000 en el software ArcGis10.5®. Se realizó corroboración en el campo y actualización de usos, georreferenciando actividades a lo largo de la cuenca, con el navegador GPSmap 60CSx con +/- 3m de error.

Se establecieron márgenes en las riberas de los ríos según Mena-Rivera *et al.* (2018) para determinar tanto el uso del suelo de la zona como su afectación sobre el agua, a través de los resultados obtenidos del uso del suelo y de los índices aplicados con el fin de proponer medidas de mitigación a las autoridades de la zona para establecer la protección de este recurso, en relación con el uso del suelo y el manejo de las zonas de protección de los ríos de la subcuenca Quebrada Honda y Chiz-Maravilla.

2.7. Análisis de los datos

Para la clasificación de la calidad de agua mediante los resultados del índice BMWP-CR se utilizó la representación de colores que se presenta en el Cuadro 3, de acuerdo con el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (MINAE 2007).

Cuadro 3. Clasificación de calidad del agua superficial según el BMWP-CR adaptado para Costa Rica según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales 33903-MINAE-S 2007.

Descripción	BMWP-CR	Color Representativo
Aguas de calidad excelente	>121	Azul
Aguas de calidad buena, no contaminadas o no alteradas de manera sensible	101-120	Celeste
Aguas de calidad regular, contaminación moderada	61 – 100	Verde
Aguas de calidad mala, contaminadas	36 – 60	Amarillo
Aguas de calidad mala, muy contaminadas	16 – 35	Naranja
Aguas de calidad muy mala, extremadamente contaminadas	>15	Rojo

También, usando los datos físico-químicos y microbiológicos obtenidos en la caracterización del cuerpo de agua, se utilizó el Índice de Calidad del Agua (WQI) mostrado en el Cuadro 4, elaborado por el Centro de Investigación del Agua (Water Research Center. www.water-research.net/watrqualindex/waterqualityindex.htm) y el Índice del Sistema Holandés de Valoración de Calidad de Físico-Química del Agua, para determinar la calidad del agua de acuerdo con el reglamento de clasificación de la calidad del agua superficial (Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales 33903-MINAE-S 2007) (Cuadro 5).

Cuadro 4. Clasificación de la calidad del agua según el WQI (Water Research Center).

Índice WQI	
Rango de Puntaje Obtenido	Calidad del Agua
90-100	Excelente
70-89	Buena
50-69	Media
25-49	Mala
0-24	Muy Mala

Cuadro 5. Clasificación de la calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales 33903-MINAE-S 2007.

Clase	Sumatoria de Puntos	Interpretación de la calidad
1	3	Sin contaminación
2	4-6	Contaminación incipiente
3	7-9	Contaminación moderada
4	10-12	Contaminación severa
5	13-15	Contaminación muy severa

Para estimar la riqueza y abundancia relativa de las familias de macroinvertebrados en los puntos muestreados, así como la presencia de algunos géneros, se calculó el índice de riqueza de Margalef y el índice de equidad de Shannon-Wiener. Para determinar los cambios en la comunidad bentónica se realizó una comparación de la diversidad entre sitios, mediante el índice de similitud de Jaccard, que tiende a 0 cuando no existen especies compartidas entre sitios y a 1 cuando se presenta la misma composición de especies (Reyes & Torres-Flores 2009), y los índices de diversidad mencionados anteriormente, de acuerdo con Ludwig y Reynolds (1988).

Se estableció el promedio de los parámetros físico-químicos y de los valores de las familias en el tiempo. Y se compararon los diferentes parámetros medidos esperando que concuerden en calidad del agua tanto los índices fisicoquímicos (Índice Holandés) como el biológico (BMWP-CR) y la clasificación de la calidad del agua de acuerdo con la legislación actual.

Se observó la normalidad de los datos obtenidos a través de pruebas de Shapiro-Wily y de Jarque-Bera; posteriormente se analizó la variabilidad de los ríos a través de un análisis de componentes principales para determinar cuáles parámetros de todos los obtenidos determinan dicha variabilidad. Para el análisis de componentes principales se utilizó la macro de Excel XLSTAT Addinsoft Evaluación 2018.5.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultados de los Análisis Biológicos

Se registraron 30 familias de macroinvertebrados bentónicos pertenecientes a 12 órdenes con un total de 2517 individuos (Cuadro 6). El punto de muestreo con mayor abundancia fue el punto RQH01 con $n=875$, sin embargo, se observa que de la cantidad de individuos por punto, 98% están distribuidos en los órdenes de Annelida, Diptera y Molusco, asociados con altos grados de contaminación.

La presencia y dominancia de estos órdenes mencionados hacen que el punto RQH01 sea un área sumamente contaminada, esta abundancia en una zona tan degradada se puede explicar en la capacidad que tienen las larvas de varios taxones debido a un tipo de hemoglobina que les permite sobrevivir en aguas con muy bajos niveles de oxígeno y por eso se pueden adaptar a niveles altos de contaminación (Oviedo-Machado y Reinoso-Flórez 2018). Asimismo, estudios de Liévano y Ospina (2007) realizados en el río Bahamon en Colombia, detallan la amplia distribución de Annelida, Diptera y Molusco en todos los tipos de hábitats acuáticos, en sistemas lóticos, lénticos y sobre todo tipo de sustratos, alta tolerancia a condiciones adversas y diversas calidades del agua, que se pueden encontrar abundantemente en aguas contaminadas y con altos contenidos de materia orgánica.

A nivel taxonómico de familia, la mayor abundancia se reportó para Chironomidae (Diptera) con 831 individuos (33% de la abundancia total), lo que indica alta contaminación a lo largo de la subcuenca. Esta es la familia de macroinvertebrados de mayor abundancia y distribución en todos los ecosistemas dulceacuícolas, y con frecuencia es el grupo más diverso y profuso en el bentos de los sistemas fluviales (Rosa *et al.* 2014), son de las familias más diversos y son indicadores de agua de mala calidad, utilizados en estudios de monitoreo de tolerancia a la contaminación en aguas (Kranzfelder y Leonard 2018).

Se puede observar en el Cuadro 6, como esta familia de Chironomidae se encuentra en grandes cantidades a lo largo de los distintos puntos de muestreo, con excepción del punto RM06, que según los resultados obtenidos cuenta con muy poca presencia de macroinvertebrados bentónicos. Sin embargo, cuenta con presencia de órdenes como

Molusco o Annelida que son organismos que resisten altas perturbaciones como materia orgánica suspendida (Pan *et al.* 2015) e inclusive disminuciones en los niveles de oxígeno disuelto (Fernández y Londoño 2015).

La segunda familia más representada fue Hydropsychidae, del orden Trichoptera, de la cual se obtuvieron 621 individuos (25%). Esta familia, según Springer (2010) se encuentra entre las familias más abundantes en los ríos que representan ambientes acuáticos de calidad buena a regular, sin embargo, al ver los resultados del Cuadro 8 podemos indicar que la contaminación de la cuenca es alta, esto debido a la presencia de familias tolerantes como Chironomidae u Oligochaeta a lo largo de la trayectoria en los distintos puntos de muestreo demuestra que la contaminación de la cuenca es constante y ha permitido que este tipo de organismo sea favorecido (Martins *et al.* 2017)

Las actividades antropogénicas y la vulnerabilidad del suelo para pequeñas y grandes áreas urbanas son la principal fuente de contaminación en la cuenca; no obstante, las zonas rurales son afectadas por la actividad humana contaminante, pues las descargas contienen en su mayoría excretas humanas y animales, residuos químicos e industriales de empresas privadas o estatales, insecticidas y fertilizantes (Gómez-Duarte 2018).

Según Islam *et al.* (2018) las principales fuentes de contaminación de agua superficial son descargas de aguas residuales, filtraciones sépticas y zonas con escorrentía agrícola, por consiguiente, esta contaminación se puede deber a la influencia de fuentes potenciales de contaminación observados a lo largo de la zona como por ejemplo distintas descargas de aguas residuales, tanto industriales como domésticas. Sharifinia *et al.* (2016) expone resultados similares al analizar diferentes ríos y encontrar que la principal causa de contaminación es de influencia antrópica, lo que provocan impactos adversos en las comunidades de macroinvertebrados, concordando con Gómez-Anaya *et al.* (2017) quienes obtuvieron que la diversidad de odonatos y otros macroinvertebrados bentónicos disminuyen al ser impactados por descargas domésticas y escorrentías de zonas agrícolas.

Cuadro 6. Resultados obtenidos del muestreo biológico de macroinvertebrados bentónicos en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica. (Elaboración propia)

Orden	Familia	Punto de Muestreo									
		RQH01	RM04	RQH02	RQH03	RM05	RCH08	RCH09	RM06	RM07	RCH10
Annelida	Tubificidae	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Annelida	Hirudinea	36	1	1	1	8	0	0	0	1	0
Annelida	Oligochaeta	19	6	12	4	0	0	1	5	8	2
Coleoptera	Elmidae	0	0	8	1	1	4	11	0	0	28
Coleoptera	Dryopidae	0	0	3	23	6	8	9	0	7	7
Coleoptera	Psephenidae	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Coleoptera	Hydrophilidae	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Coleoptera	Ptilodactylidae	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2
Crustacea	Palaemonidae	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Diptera	Chironomidae	667	27	30	1	19	21	34	0	26	6
Diptera	Tipulidae	0	9	0	0	0	0	4	0	0	0
Diptera	Simuliidae	0	29	48	18	30	0	47	0	14	27
Ephemeroptera	Baetidae	0	20	7	26	41	0	43	1	20	0
Ephemeroptera	Leptohiphidae	0	0	8	2	0	1	3	3	5	5
Hemiptera	Belostomatidae	0	0	9	4	0	1	0	1	3	0
Lepidoptera	Pyrilidae	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
Megaloptera	Corydalidae	0	0	1	10	1	0	0	0	0	2
Molusco	Hydrobiidae	66	4	0	0	29	0	0	12	9	11
Odonata	Libellulidae	14	0	6	6	7	1	9	0	0	6
Odonata	Calopterygidae	0	10	5	0	0	13	2	0	0	0
Odonata	Megapodagrionidae	0	1	6	0	0	0	3	2	0	0
Odonata	Lestidae	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
Odonata	Platystictidae	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0
Odonata	Coenagrionidae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Odonata	Gomphidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Trichoptera	Hydropsychidae	0	163	85	47	125	40	25	69	67	0
Trichoptera	Polycentropodidae	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
Trichoptera	Philopotamidae	0	0	0	7	11	11	3	0	0	4
Trichoptera	Hydroptilidae	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0
Tricladida	Turbellaria	3	1	0	3	2	4	0	0	5	0
Total		875	291	233	168	280	109	197	93	166	105

El Índice de Diversidad de Margalef (Fig. 3) se encontró entre las unidades 0,89 (RQH01) y 3,318 (RQH03). El Índice de Equidad de Shannon-Wiener (Fig. 3) se encontró entre los valores de 0,904 (RQH01) y 2,262 (RQH03). Esto muestra como hay un aumento en la riqueza y diversidad de especies hasta alcanzar su pico máximo en el punto RQH03, sin embargo, los puntos RQH01 y RM06 se presentan como los puntos más bajos. Esto pudo estar influido por las condiciones en los puntos de muestreo, ya que durante los muestreos se observaron en el punto RQH01 diversas fuentes de contaminación puntual observadas como descargas de aguas grises provenientes de casas, así como residuos de aceite de comercios y lubricentos. El punto RM06 se ve impactado por las descargas que realiza el ingenio Juan Viñas provocando que la temperatura de agua aumente a niveles muy altos de hasta 36,7 °C (Cuadro 10) lo cual hace que la supervivencia para la mayoría o muchas especies de macroinvertebrados sea difícil, así como se demostró en el Cuadro 6 con la poca cantidad de especies encontradas en este punto.

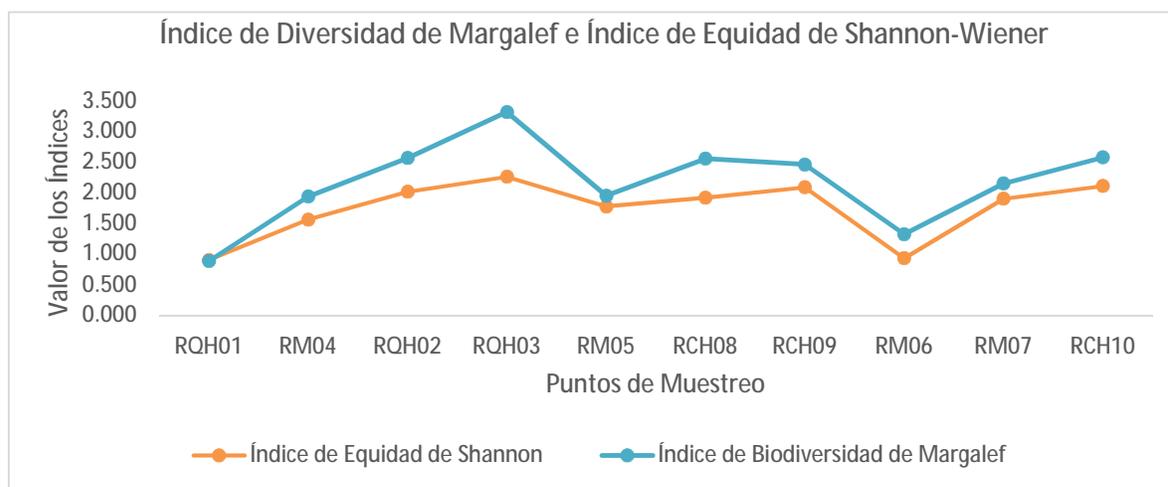


Figura 3. Resultados del Índice de Diversidad de Margalef e Índice de Equidad de Shannon-Wiener, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica. (Elaboración propia)

Otra razón de las diferencias de riqueza y diversidad, se puede deber a la composición y diferencias de los puntos de muestreo, el punto de menor valor (RM06) es un río de fondo arenoso, por lo cual alberga pocas especies con pocos individuos por especie (Mesa-S *et al* 2012) y en donde es común encontrar ordenes representativos de

mala calidad de aguas debido a los bajos niveles de oxígeno que presenta (Fernández y Londoño 2015), a diferencia de los fondos en los ríos pedregosos (como RQH03) dominados por la hojarasca, con piedras grandes y vegetación que provocan que la fauna sea más diversa y difiera de la fauna de otros sustratos (Burdet y Watts 2009).

Los resultados del Índice de Similitud de Jaccard (Cuadro 7), muestra que no existen puntos con cero similitudes, lo que significa que todos los puntos comparten al menos alguna especie, pero no había ningún punto con la misma composición de especies. Sin embargo, cabe resaltar el punto RM07, el cual comparte el 50 % de sus especies con al menos 4 puntos a lo largo de la cuenca, puntos que se encuentran en la zona media de la cuenca compartiendo características similares por lo que se puede inferir una homogeneidad entre esos puntos.

Cuadro 7. Resultados del Índice de Similitud de Jaccard para cada punto de muestreo en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica. (Elaboración propia)

	RQH01	RM04	RQH02	RQH03	RM05	RCH08	RCH09	RM06	RM07
RM04	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-
RQH02	0.22	0.42	-	-	-	-	-	-	-
RQH03	0.25	0.30	0.57	-	-	-	-	-	-
RM05	0.36	0.41	0.50	0.58	-	-	-	-	-
RCH08	0.18	0.19	0.40	0.48	0.47	-	-	-	-
RCH09	0.17	0.44	0.61	0.45	0.44	0.42	-	-	-
RM06	0.17	0.19	0.38	0.25	0.19	0.18	0.31	-	-
RM07	0.36	0.50	0.50	0.50	0.50	0.32	0.37	0.46	-
RCH10	0.25	0.19	0.40	0.41	0.39	0.30	0.50	0.18	0.32

Según los índices de calidad aplicados, el agua a través de toda la cuenca se encuentra severamente contaminada. Los resultados del Índice BMWP-CR (Cuadro 8) muestran que los puntos de muestreo tienen una calidad que va desde “contaminación muy severa” hasta “contaminación moderada”, esto se puede deber a que la zona se encuentra altamente deteriorada debido a todas las influencias de los focos de contaminación causados por las actividades humanas a la que está sometida, como las descargas de aguas residuales y basura provocando cambios tanto en la calidad del agua como en las comunidades de macroinvertebrados (Ambarita *et al.* 2017). Según K. Luo *et al* (2017) la influencia antropogénica sobre los ríos provoca los principales impactos negativos sobre las

comunidades de macroinvertebrados, como ambientes hostiles para las poblaciones y por lo tanto perdida de la diversidad como lo exponen Gómez-Anaya *et al.* (2017) y Rodríguez *et al.* (2017) quienes obtuvieron resultados de calidad de agua contaminada en zonas donde existía una influencia de actividades y viviendas humanas que afectaban directamente las cuencas.

Cuadro 8. Resultados obtenidos del Índice BMWP-CR para cada punto de muestreo en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago Costa Rica.

Punto de Muestreo	Muestreo	BMWP-CR	Calidad el Punto	Interpretación de la Calidad
RQH01	1	9	Rojo	Contaminación muy severa
	2	14		
	3	12		
	4	9		
RM04	1	33	Naranja	Contaminación Severa
	2	17		
	3	32		
	4	24		
RQH02	1	56	Naranja	Contaminación Severa
	2	45		
	3	23		
	4	46		
RQH03	1	61	Naranja	Contaminación Severa
	2	55		
	3	20		
	4	50		
RM05	1	46	Naranja	Contaminación Severa
	2	27		
	3	33		
	4	40		
RCH08	1	42	Naranja	Contaminación Severa
	2	16		
	3	26		
	4	30		
RM06	1	3	Rojo	Contaminación muy severa
	2	20		
	3	22		
	4	4		
RM07	1	29	Naranja	Contaminación Severa
	2	18		
	3	22		
	4	24		
RCH09	1	57	Naranja	Contaminación Severa

	2	17		
	3	39		
	4	24		
	1	69		
RCH10	2	27	Naranja	Contaminación Severa
	3	28		
	4	55		

Elaboración propia

3.2. Resultados Microbiológicos

El Cuadro 9 muestra los resultados obtenidos en los estudios microbiológicos de coliformes fecales, se puede observar que los resultados más bajos obtenidos van desde los 230 NMP/100 mL hasta los 240000 NMP/100 mL. Según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (MINAE 2007) los resultados obtenidos clasifican a la cuenca como una cuenca contaminada, el punto de muestreo RCH09 presenta la mejor clasificación (verde) en comparación con los otros puntos ya que los valores en este punto no superaron los 1000 NMP/100 mL de coliformes fecales. Estos indicadores son altamente utilizados para determinar presencia de contaminación fecal y se han correlacionado directamente con bacterias patógenas en el agua (Sivaraja y Nagarajan 2014).

El agua en el punto RCH09 es clasificada como clase 2, por tanto, puede ser utilizada para actividades de contacto primario o riego e inclusive para consumo con un tratamiento convencional (MINAE 2007). Estos resultados coinciden con Divya & Solomon (2016), y Whitehead *et al.* (2018) quienes han demostrado que en ríos muy contaminados se pueden obtener resultados de baja concentración de coliformes fecales en diversos puntos, principalmente en puntos con caudales muy altos, tal es el caso del punto RCH09 que presentó a lo largo de los muestreos el caudal más abundante de todos los puntos realizados.

Asimismo, el punto RQH01 presentó los valores de coliformes fecales más altos clasificando ese punto con clase 5 y contaminación muy severa, Bravo *et al.* (2017) exponen una relación entre la concentración de coliformes fecales y el caudal del cuerpo de agua, en el que confirman que las bacterias coliformes no se encuentran distribuidas

homogéneamente a lo largo del cauce, sin embargo, en cauces de menor tamaño la concentración de éstos tiende a aumentar.

El sitio RQH01 fue uno de los puntos con menor caudal y varias fuentes puntuales de contaminación en su alrededor (Fonseca *et al.* 2018), en este punto de muestreo se encontró la mayor contaminación fecal a lo largo de la cuenca. Liu *et al.* (2015) demostraron a través de diversos modelos que la contaminación en un río con caudal amplio y con altas concentraciones de coliformes fecales se mantiene a lo largo de éste, por lo que en casos de obtener resultados de una clase menor en un punto de muestreo no se pueden tomar como una confirmación de poca contaminación en el río. Sin embargo, la relación entre el caudal y los niveles de contaminación no se pueden confirmar para otros sitios en la cuenca.

Cuadro 9. Resultados microbiológicos obtenidos para cada punto, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.

Punto de muestreo	Muestreo	Coliformes Fecales NMP/100mL	Clase	Calidad el Punto	Interpretación de la Calidad según Reglamento 33903-MINAE-S
RQH01	1	70000	5	Rojo	Contaminación muy Severa
	2	240000	5		
	3	130000	5		
	4	240000	5		
RM04	1	7900	5	Rojo	Contaminación muy Severa
	2	790	2		
	3	1100	3		
	4	790	2		
RQH02	1	490	2	Naranja	Contaminación Severa
	2	940	2		
	3	3300	4		
	4	1700	3		
RQH03	1	2400	4	Rojo	Contaminación muy Severa
	2	33000	5		
	3	7000	5		
	4	790	2		
RM05	1	2400	4	Naranja	Contaminación Severa
	2	170	2		
	3	1300	3		
	4	330	2		
RCH08	1	49000	5	Rojo	Contaminación muy Severa
	2	49000	5		
	3	490	2		
	4	3300	4		

RM06	1	13000	5	Rojo	Contaminación muy Severa
	2	14000	5		
	3	33000	5		
	4	3300	4		
RM07	1	7900	5	Rojo	Contaminación muy Severa
	2	7900	5		
	3	2400	4		
	4	2200	4		
RCH09	1	490	2	Verde	Contaminación Incipiente
	2	490	2		
	3	330	2		
	4	330	2		
RCH10	1	1700	3	Naranja	Contaminación Severa
	2	4900	4		
	3	940	2		
	4	230	2		

Elaboración propia

3.3. Resultados Físicoquímicos

En cuanto a los resultados físicoquímicos, se detectó una temperatura media que osciló entre los 16,5 °C y 26, 65 °C (Cuadro 10), el valor más alto se encontró en el punto RM06 ya que este punto al ser muestreado se observó que recibía descargas provenientes del Ingenio Juan Viñas, además que los alrededores del punto RM06 corresponde a una de las zonas con mayor cantidad de fuentes puntuales de contaminación en la cuenca (Fonseca *et al.* 2018). El aumento considerable de la temperatura del agua en este sitio puede estar generando una afectación directa sobre la población de macroinvertebrados (Cuadro 6); Guerrero-Bolaño *et al.* (2003) relaciona directamente la temperatura con el desarrollo de la biota, demostrando una disminución de la misma conforme se aumenta la temperatura.

Muchos de los parámetros analizados muestran resultados físicoquímicos que mantuvieron una media muy estable a lo largo de los distintos puntos de muestreo (Cuadro 10), sin embargo, los valores altos de las Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) ubican al río como clase 3; estas sustancias son de origen antropogénico y sus altos valores indican presencia de contaminación en el río (Rincón-Silva 2017), esto concuerda con los resultados obtenidos de Sólidos Suspendidos, Sólidos Disueltos y DQO demuestran según Ribeiro *et al.* (2014) que los cuerpos de agua afectados por suelos agrícolas contienen una alta carga de materia orgánica y permiten una mayor erosión de suelos; consecuentemente,

favorecen el ingreso de materia orgánica de la cuenca de captación y, por lo tanto, incrementan los valores fisicoquímicos y nutrientes en el curso de los ríos (Egler *et al.* 2012).

En el Cuadro 10 se puede observar también que los valores obtenidos de DQO, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos se encuentran en un rango alto según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Aguas Superficiales (MINAE 2007) lo que indica una gran carga orgánica sobre estas aguas debido a efluentes de aguas domésticas que provocan la saturación de los ríos y quebradas (Villamarín *et al.* 2014, Fonseca *et al.* 2018). En un análisis de aguas superficial los valores de DQO siempre serán superiores a los de la DBO debido a que muchas sustancias orgánicas tienen la capacidad de oxidarse químicamente pero no biológicamente, por lo que si se establece una relación DBO/DQO, se va a obtener que los vertidos presentados en la cuenca son de naturaleza industrial y urbana, poco biodegradables y con necesidad de tratamiento (Custodio *et al.* 2018), por lo tanto los ríos estudiados están siendo impactados con niveles de contaminación considerables, ya que en zonas rurales con niveles altos de DBO se debe a la falta de tanque sépticos y descargas de aguas residuales tanto urbanas como industriales directamente sobre los arroyos y ríos (Forio *et al.* 2017).

Cuadro 10. Resultados Fisicoquímicos obtenidos para cada punto, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.

		Punto de muestreo									
Parámetros		RQH01	RM04	RQH02	RQH03	RM05	RCH08	RM06	RM07	RCH09	RCH10
Amonio mg/L	Máx	0,51	0,47	0,67	0,55	0,39	0,05	0,61	0,24	0,05	0,05
	Medi a	0,17	0,16	0,21	0,18	0,14	0,05	0,19	0,10	0,05	0,05
	Min	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Arsénico µg/L	Máx	0,10	0,30	0,10	0,60	0,30	0,10	0,40	0,40	0,10	0,40
	Medi a	0,10	0,15	0,10	0,33	0,15	0,10	0,18	0,18	0,10	0,18
	Min	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Cloruros mg/L	Máx	7,25	1,68	3,85	2,74	1,61	0,40	2,12	11,84	1,76	2,54
	Medi a	6,34	1,53	3,46	2,40	1,50	0,40	1,80	3,57	1,52	1,95
	Min	5,22	1,45	3,02	2,08	1,39	0,40	1,59	0,40	1,22	1,58
Conductividad µs	Máx	300,00	111,00	130,00	151,00	197,00	88,00	220,00	344,00	85,00	174,00

	Medi a	224,75	103,0 0	124,50	140,00	123,25	80,25	129,7 5	166,25	60,10	149,50
	Min	190,00	90,00	120,00	116,00	80,00	70,00	77,00	98,00	7,38	122,00
DBO mg/L	Máx	26,00	12,00	9,40	13,00	9,00	5,90	36,00	14,00	8,00	29,00
	Medi a	19,25	6,58	5,65	5,38	5,08	4,28	20,78	9,70	3,64	10,08
	Min	15,00	3,60	2,70	1,60	1,60	2,20	5,10	5,60	0,65	2,60
DQO mg/L	Máx	50,00	18,00	17,00	24,00	22,00	15,00	210,0 0	29,00	18,00	50,00
	Medi a	43,25	12,75	11,25	11,00	12,25	10,75	75,50	22,00	9,00	19,50
	Min	30,00	10,00	6,00	4,00	5,00	8,00	11,00	12,00	4,00	8,00
Fluoruros mg/L	Máx	0,32	0,38	0,25	0,25	0,30	0,03	0,28	0,16	0,15	0,15
	Medi a	0,17	0,17	0,12	0,12	0,15	0,03	0,14	0,06	0,06	0,06
	Min	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Magnesio mg/L	Máx	4,60	6,40	5,10	8,30	5,40	4,40	4,90	5,00	3,70	7,30
	Medi a	4,35	4,93	4,75	6,70	4,45	3,93	4,05	4,45	2,70	5,48
	Min	3,90	4,10	4,40	5,00	3,40	3,00	3,20	3,90	2,10	3,30
Nitratos	Máx	17,49	5,00	9,98	6,62	4,31	0,37	3,67	7,79	5,00	5,52
	Medi a	7,97	4,10	5,16	5,21	3,20	0,37	2,06	3,63	2,48	3,59
	Min	3,11	3,40	3,21	4,44	2,61	0,37	0,37	0,37	0,37	2,38
Nitritos	Máx	0,11	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,27	0,03	0,03
	Medi a	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,09	0,03	0,03
	Min	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
O₂ D Agua mg/L	Máx	6,81	8,09	7,65	7,79	7,90	7,78	7,59	7,65	7,83	8,10
	Medi a	4,02	7,37	6,91	7,22	7,20	6,86	5,15	6,69	7,05	7,15
	Min	3,85	5,53	5,01	5,76	5,73	4,96	2,20	4,08	5,41	5,38
O₂ Agua %	Máx	58,60	98,80	96,20	98,40	99,40	96,50	97,30	94,80	97,60	98,10
	Medi a	51,37	85,03	82,70	86,17	80,50	82,53	61,20	68,03	85,77	84,60
	Min	45,00	58,30	55,80	62,40	63,20	57,70	30,10	46,70	64,20	60,40
pH	Máx	7,18	7,70	7,69	7,85	7,80	7,69	7,78	7,60	8,20	7,86
	Medi a	7,08	7,58	7,53	7,72	7,68	7,56	7,36	7,41	7,86	7,69
	Min	6,97	6,97	7,34	7,65	7,43	7,37	6,92	6,99	7,72	7,32
Sólidos Suspendidos Totales mg/L	Máx	58,00	75,00	46,00	42,00	51,00	39,00	48,00	35,00	38,00	127,00
	Medi a	25,25	50,50	23,00	21,00	30,75	18,13	23,50	19,75	21,50	56,25
	Min	6,00	28,00	6,00	8,00	7,00	4,50	11,00	2,00	14,00	13,00
Sólidos Disueltos mg/L	Máx	344,00	394,0 0	358,00	280,00	292,00	214,00	269,0 0	306,00	240,00	340,00
	Medi a	243,75	211,5 0	169,50	184,50	292,00	119,25	186,7 5	163,25	129,50	184,25
	Min	125,00	142,0 0	52,00	130,00	292,00	73,00	97,00	306,00	72,00	105,00
Sulfatos	Máx	39,61	11,99	9,99	6,35	4,75	0,65	6,70	7,85	1,72	6,85

	Medi a	18,61	6,58	5,51	3,95	3,42	0,65	3,86	3,88	0,92	2,96
	Min	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Sustancias Activas al azul de metileno	Máx	2,70	0,79	0,35	0,73	0,35	0,75	0,73	0,74	0,72	0,71
	Medi a	0,94	0,46	0,35	0,45	0,35	0,45	0,45	0,45	0,44	0,44
	Min	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Temperatura	Máx	19,90	17,20	20,00	22,10	20,30	21,20	36,70	26,70	21,70	24,80
	Medi a	19,20	16,55	19,23	20,83	18,98	19,58	26,65	22,68	19,80	22,45
	Min	18,60	15,30	18,40	20,00	18,00	18,50	20,40	20,40	18,10	21,00
Turbiedad	Máx	24,20	10,20	4,80	5,37	7,37	8,22	7,21	11,70	11,30	18,40
	Medi a	10,85	6,10	4,15	3,06	3,37	3,93	5,43	6,99	4,63	5,87
	Min	1,81	2,04	3,53	1,36	1,11	1,75	3,32	1,08	1,79	1,04

Elaboración propia

Se utilizaron los resultados obtenidos en cuanto a coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, fosfatos, nitratos, porcentaje de saturación del agua, pH, sólidos totales, temperatura y turbidez de cada punto y se promediaron para obtener el Índice de Calidad del Agua (WQI) para cada sitio de muestreo (Cuadro 11). Whitehead *et al* (2018) indican que estos parámetros permiten que el índice sea una buena herramienta para el entendimiento de la dinámica temporal y espacial de los nutrientes y contaminación fecal del río. Se obtuvo un índice de calidad media para 8 de 10 puntos de muestreo, y sólo los sitios RQH01 y RM06 obtuvieron una calidad mala, lo que concuerda con los resultados de índices de calidad utilizados anteriormente en este estudio. Hussein & Ali (2017) demostraron en su estudio que este índice (WQI) permite identificar si contaminantes, ya sean de origen antropogénico o naturales, afectan la cuenca conforme se avanza hacia la parte baja; sin embargo, al aplicar este índice nos demuestra que la calidad del agua a través de la cuenca se mantiene constante, y que la influencia del manejo de cultivos, aguas sin tratar y otros contaminantes han provocado que permanezca contaminada sin importar la época del año.

Cuadro 11. Resultados del Índice Water Quality Index (WQI) para cada punto, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.

Punto de Muestreo	Muestreo	QWI	Calidad en el Punto
RQH01	1	51	Mala
	2	51	
	3	45	
	4	45	
RM04	1	70	Media
	2	66	
	3	65	
	4	59	
RQH02	1	70	Media
	2	69	
	3	66	
	4	62	
RQH03	1	71	Media
	2	67	
	3	61	
	4	61	
RM05	1	66	Media
	2	74	
	3	64	
	4	69	
RCH08	1	69	Media
	2	72	
	3	70	
	4	62	
RM06	1	42	Mala
	2	64	
	3	61	
	4	48	
RM07	1	52	Media
	2	64	
	3	66	
	4	50	
RCH09	1	72	Media
	2	69	
	3	72	
	4	71	
RCH10	1	70	Media
	2	57	
	3	68	
	4	67	

Elaboración propia

De acuerdo con los resultados de este estudio (Cuadro 11) la calidad media en los puntos de muestreo se mantiene y en la parte alta la calidad del agua es mala, ya que la presencia de contaminantes se da desde las partes altas de la cuenca hasta las partes más bajas. Este índice (WQI) ha sido utilizado en distintas cuencas para determinar la degradación de los cuerpos de agua (Wei *et al.* 2016; Hussein y Ali 2017 y Misaghi *et al.* 2017) indicando que las principales causas de contaminación son de origen natural como fertilizantes y pesticidas en las partes altas de la cuenca, y de origen antropogénico en las partes bajas como descargas de aguas residuales demostrando una degradación en aumento conforme se desciende en la cuenca (Nazeer *et al.* 2014).

El Cuadro 12 presenta los resultados obtenidos con el Índice Holandés de Valoración de la Calidad, y se observa que en ninguno de los puntos muestreados la calidad fue “sin contaminación”, ya que se obtuvieron valores que van desde “Contaminación Muy Severa” hasta “Contaminación Incipiente”, asimismo los anteriores índices demuestran que la cuenca se encuentra contaminada. El único que mostró, en toda la cuenca, valores bajos de contaminación fue el punto RCH09 que presentó contaminación incipiente, esto se puede deber a los valores bajos de DBO encontrados en este sitio (Cuadro 10), ya que los valores de DBO aumentan entre más influencia de descargas de aguas residuales se encuentren, debido a la carga tan concentrada de materia orgánica que presentan (Donia y Bahgat 2016), en el sitio RCH09 las fuentes puntuales y difusas de contaminación disminuyen considerablemente (Fonseca *et al.* 2018). A pesar de esto, los otros índices obtenidos muestran que este punto sí se presenta algún grado de contaminación, lo que concuerda con Sun *et al.* (2016) donde exponen que para demostrar verdaderamente la calidad de ríos superficiales es necesario la utilización de distintos índices y mayor número de muestreos.

Cuadro 12. Resultados Obtenidos del Índice Holandés de Valoración de la Calidad para cada punto, en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.

Punto	Muestreo	Valor Índice Holandés	Calidad el Punto	Interpretación de la Calidad según Reglamento 33903-MINAE-S
RQH01	1	10	Naranja	Contaminación Severa
	2	10		
	3	8		
	4	11		
RM04	1	5	Amarillo	Contaminación Moderada
	2	7		
	3	6		
	4	6		
RQH02	1	6	Amarillo	Contaminación Moderada
	2	7		
	3	4		
	4	6		
RQH03	1	4	Amarillo	Contaminación Moderada
	2	5		
	3	7		
	4	7		
RM05	1	5	Verde	Contaminación Incipiente
	2	5		
	3	6		
	4	5		
RCH08	1	5	Verde	Contaminación Incipiente
	2	4		
	3	5		
	4	6		
RM06	1	10	Naranja	Contaminación Severa
	2	7		
	3	6		
	4	12		
RM07	1	5	Amarillo	Contaminación Moderada
	2	7		
	3	5		
	4	9		
RCH09	1	5	Verde	Contaminación Incipiente
	2	6		
	3	4		
	4	5		

RCH10	1	5	Amarillo	Contaminación Moderada
	2	8		
	3	5		
	4	5		

Elaboración propia

De las pruebas realizadas de normalidad se obtuvo que los datos no muestran una distribución normal, por lo que se realizó, para el análisis de componentes principales, una matriz de correlación de Spearman. Los resultados del análisis de componentes principales para observar variabilidad del río se muestran en la Figura 4.

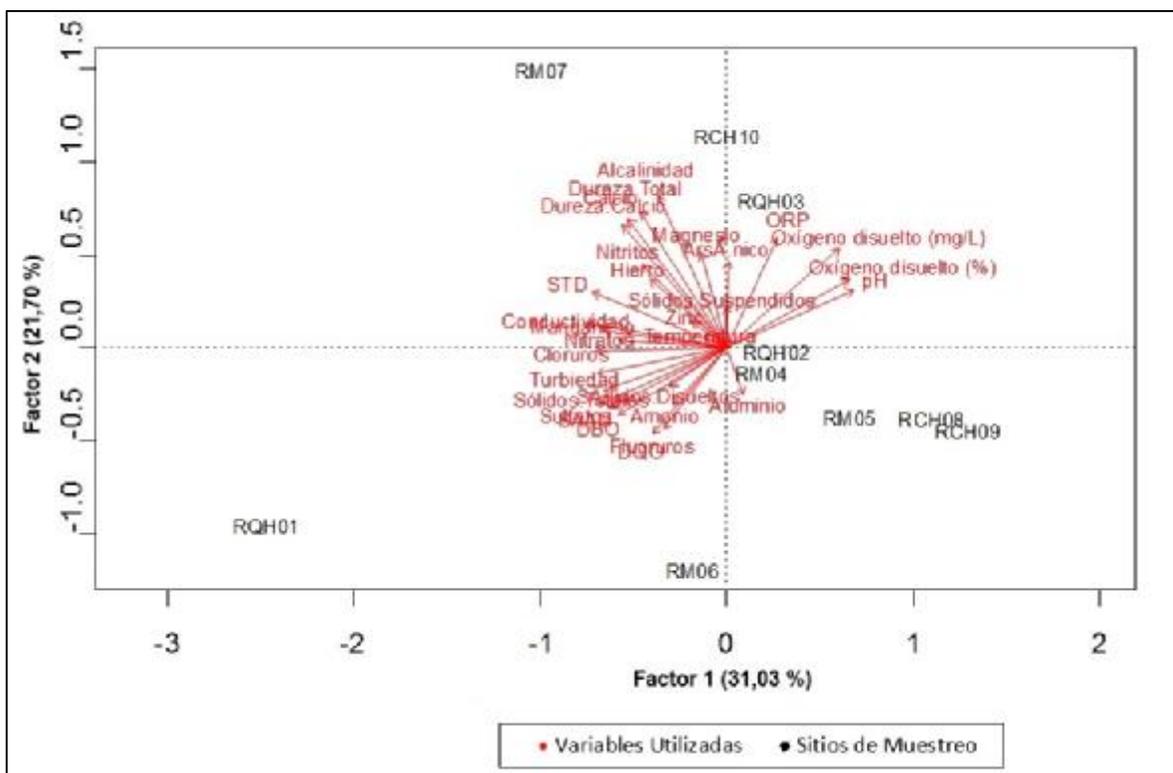


Figura 4. Análisis de componentes principales obtenidos en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.

El análisis de componentes principales establece los patrones de comportamiento entre las variables estudiadas y su influencia sobre los puntos de muestreo (Polanco 2016). Se obtuvo una variabilidad del 52,73% y una tendencia en las variables coincidiendo con los índices analizados y los resultados obtenidos ya que indican mayor contaminación hacia los puntos de muestreo más afectados.

La Figura 4 muestra la relación que tienen los parámetros en cuanto a la contaminación de los ríos, por lo que resultados como coliformes fecales, turbiedad, sólidos suspendidos, DBO y DQO se agrupan en un solo cuadrante indicando el grado de contaminación que la cuenca tiene, a diferencia de variables como pH que no son tan determinantes a la hora de evaluar la contaminación de la cuenca.

Como se puede observar en la Figura 4, en los ejes izquierdos, la tendencia presentada por las variables de coliformes fecales, sólidos suspendidos y DQO son indicadores de alta contaminación en ríos (Martínez-Santos et al. 2018) y coinciden con los puntos RQH01, RM06 y RM07 que como se ha indicado anteriormente son puntos que presentan gran contaminación. Así también los ejes derechos de la Figura 4, muestran los puntos menos alterados de la cuenca como RM05 o RCH09 los cuales a pesar de que son afectados por las variables que son indicadoras de contaminación, las presentan en una menor cantidad.

Esto concuerda con lo obtenido por Mena-Rivera et al. (2018) y Taco-Taco *et al.* (2017) en donde se evidencia a través de plumas de contaminación, que las variables estudiadas que son mayores indicadoras de contaminación se agrupan con respecto a los puntos de muestreo más contaminados. Esto sería de gran avance para el análisis de aguas superficiales, ya que se indica que variables son las de mayor impacto, por lo que se puede analizar con mayor eficacia los cuerpos de agua.

Este tipo de análisis demuestra la importancia del estudio de los parámetros complementarios mencionados en el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Aguas Superficiales (MINAE 2007) ya que son variables que determinan la contaminación y que en conjunto con los índices muestran un panorama completo de la situación ambiental de los ríos y quebradas.

3.4. Resultados de Uso de Suelo

Se encontraron 9 tipos de uso del suelo en los márgenes de los ríos, entre los que se encuentran Bosque Intervenido y Riberino, plantaciones de caña de azúcar, de café, hortalizas y verduras, así como árboles frutales y coníferas. En el Cuadro 13 se muestra que el Río Chiz obtuvo que gran porcentaje del área es de bosque riberino e intervenido,

lo que según Vanzela *et al.* (2010) podría favorecer el aumento en la mejora de algunos atributos de calidad del agua, por lo que puede ser la razón que el Río Chiz y Río Maravilla tengan los puntos que presenta mejor calidad de agua pertenecientes a la misma zona (RCH08 y RM05), con respecto a los demás puntos de la cuenca. También se observa que otro gran porcentaje es utilizado a ambos lados del río para cultivos y distintos usos de agricultura, principalmente para el café que puede representar un riesgo para las aguas de las zonas de no manejarse responsablemente; lo que coincide con las zonas de contaminación difusa de categoría moderada de acuerdo al estudio de amenaza de contaminación de Fonseca *et al.* (2018)

Cuadro 13. Uso de suelo para cada margen del Río Chiz, Maravilla y Quebrada Honda.

Cobertura	Río Chiz		Río Maravilla		Quebrada Honda	
	Margen Derecho (ha)	Margen Izquierdo (ha)	Margen Derecho (ha)	Margen Izquierdo (ha)	Margen Derecho (ha)	Margen Izquierdo (ha)
Bosque intervenido	71.53	41.60	49.75	39.54	35.28	18.10
Bosque ribertino	12.27	15.56	22.73	25.80	3.14	3.73
Caña de azúcar	42.77	17.08	76.94	52.59	1.08	NA
Café	44.43	58.13	15.09	35.77	10.93	17.46
Coníferas	NA	NA	2.25	9.93	NA	NA
Frutales	2.02	NA	NA	NA	NA	NA
Hortalizas y verduras	NA	10.77	16.69	7.52	7.74	3.35
Pastos	13.76	44.67	21.35	29.53	19.96	28.23
Urbano	1.78	2.50	16.18	13.32	2.25	4.64
Total general	187.58	190.32	220.99	213.98	80.39	75.51

Para el Río Maravilla se puede observar que la zona se encuentra muy fragmentada y el principal uso es el cultivo de caña de azúcar. Durante los muestreos realizados se observó la gran influencia de la actividad del cultivo de caña sobre las aguas de este río, dado que se encontraron fuentes puntuales de descargas, específicamente en donde se localiza el ingenio provocando que los puntos de este río presentaran altos niveles de contaminación, principalmente en el punto RM06 (Fonseca *et al.* 2018) (Cuadro 8).

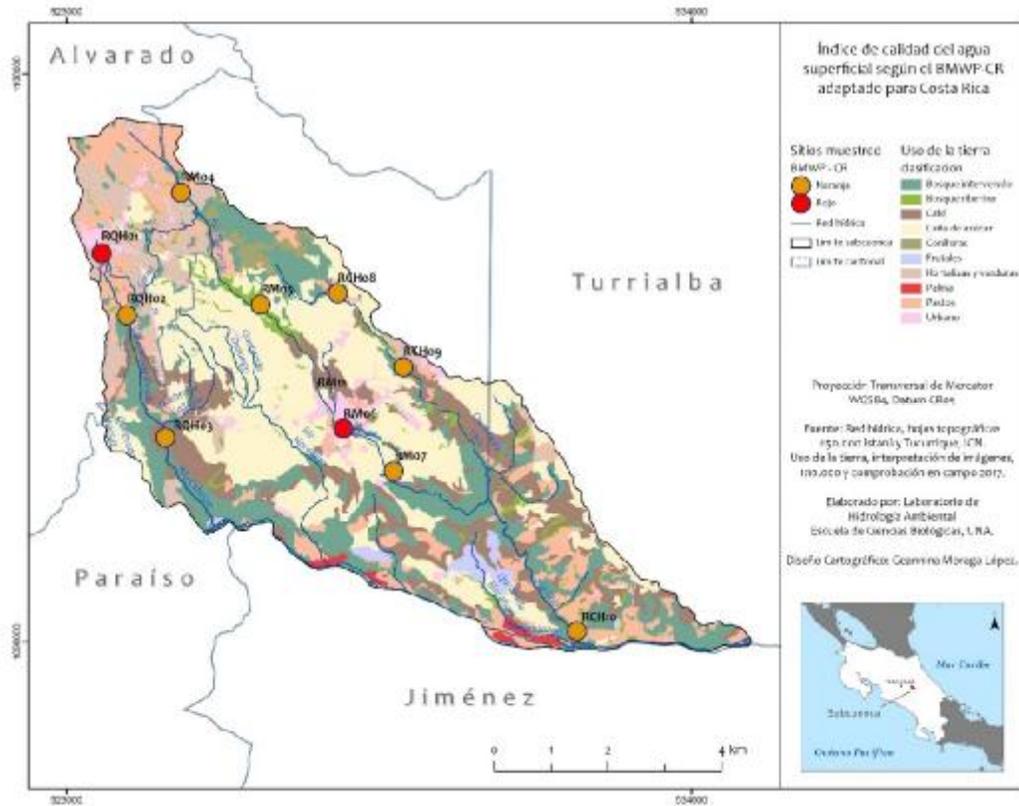


Figura 5. Uso de Suelo en comparación con el BMWP-CR en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.

En los resultados para la Quebrada Honda se obtuvo que en los márgenes predomina el bosque intervenido, así como el cultivo de hortalizas y verduras, lo que puede afectar la calidad del agua y provocar que aumenten los niveles de contaminación si no se realizan adecuadamente bajo las reglamentaciones establecidas, por ejemplo, el uso de plaguicidas, o los cultivos sin control que provocan la tala y eliminación de las zonas de protección (Samaniego 2013). Como se puede observar, a pesar de que ninguna de las zonas se encuentra altamente urbanizada, estos pequeños porcentajes de urbanización provocan una gran contaminación en la cuenca debido a descargas de aguas residuales sin control sobre las aguas, lo que indican los altos niveles de coliformes fecales (Cuadro 9), demostrando que sí existe una influencia sobre las aguas de los ríos y quebradas (Fonseca *et al.* 2018).

Reder *et al.* (2015) exponen que, a mayor porcentaje de urbanización descontrolada, mayor es la afectación sobre el suelo y el agua, y aunque las Figuras 5, 6 y 7 muestren que los porcentajes de influencia urbana son menos en comparación con otros usos del suelo, siempre logran afectar significativamente la calidad de la cuenca.

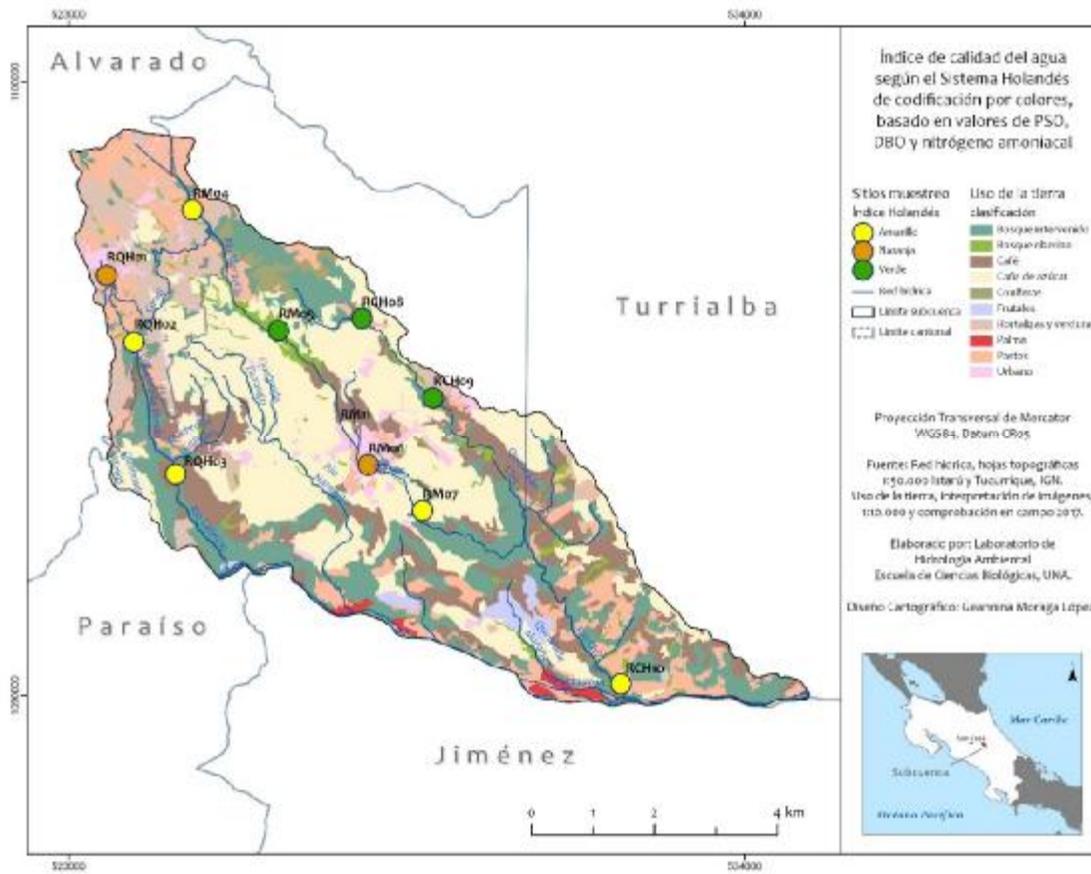


Figura 6. Uso de Suelo en comparación con el Índice Holandés en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran la relación que tiene el uso de suelo en comparación con los distintos índices de contaminación aplicados, se observa que los puntos más contaminados coinciden con el uso de suelo agrícola y con su mal manejo, tal como se mencionó.

Se puede observar que los puntos como RQH01 y RM06 mantienen niveles de contaminación altos sin importar el análisis o el índice que se utilice, coincidiendo que en sus alrededores hay presencia urbana que provoca una mayor influencia de contaminantes,

a diferencia de puntos con RCH08 que tiene en sus alrededores la presencia de bosque y por lo tanto, menos influencia antropogénica, y esto hace que sea de los puntos menos contaminados debido a la estabilidad e infiltración conseguido por la presencia de bosque (Reder *et al.* 2015). Esto coincide con lo obtenido por Mena-Rivera y Quirós-Vega (2018) en la cuenca del Río Sixaola y Mena-Rivera *et al.* (2018) y en la cuenca del Río Virilla en donde demuestra que los índices bajan su calidad conforme se aumentan los niveles de industrialización y los niveles de urbanismo, así también con Mora-Alvarado y Portuquez-Barquero (2018) quienes indican que la falta de sistemas de saneamiento y vertidos de aguas residuales representan uno de los principales problemas, actualmente, en contaminación del recurso hídrico a nivel nacional.

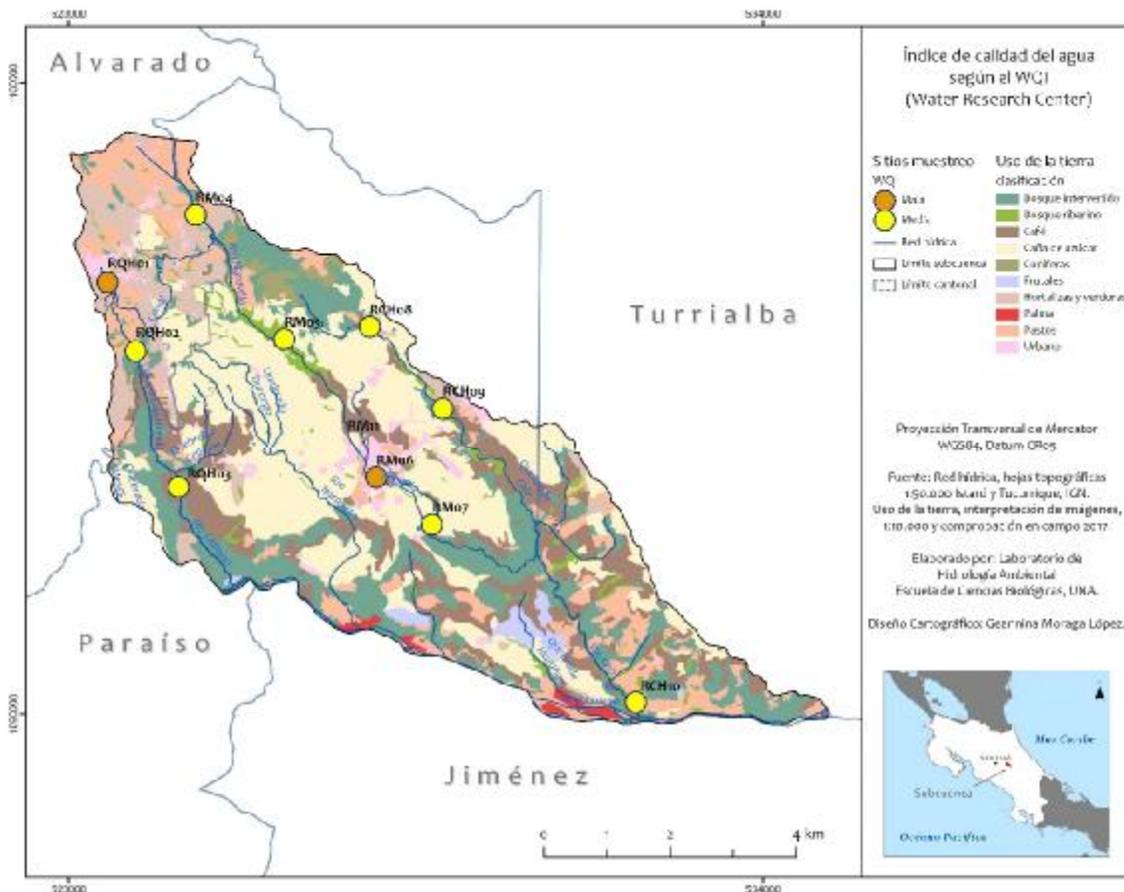


Figura 7. Uso de Suelo en comparación con el WQI en la subcuenca Quebrada Honda-Chiz Maravilla, Cartago, Costa Rica.

Así también, las presencias de bosque en los márgenes del río fomentan según Vanzela *et al.* (2010) una mayor resiliencia en la zona, es decir, que si estas aguas dejaran de recibir contaminantes de manera tan directa, tal como sucede actualmente, los ríos podrían comenzar un proceso de recuperación.

Es necesario que, a partir de estos resultados, se tomen medidas para mitigar estos impactos, de manera que no se sigan incrementando los niveles de contaminación, sino que los ríos de esta cuenca puedan empezar un proceso de recuperación en un futuro cercano. Es de vital importancia que se tomen medidas a nivel de autoridades municipales que permitan un ordenamiento territorial, la buena gestión y el manejo de la cuenca. Serrato (2015) y Mena-Rivera (2018) demuestran la misma problemática a nivel de la cuenca del Río Virilla evidenciando la situación preocupante a nivel nacional y proponiendo alternativas de educación ambiental y campañas de reforestación ribereña, por lo que es necesario incrementar la comunicación en la zona para crear conciencia a través de programas de educación ambiental que permitan involucrar a la comunidad, dueños de fincas y agricultores en la recuperación de los ríos y de ese modo, promover que se disminuya la contaminación de las aguas.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian la alta contaminación que la cuenca presenta, esto a raíz de los diferentes impactos encontrados a todo lo largo de su territorio, principalmente, en puntos influenciados con presencia urbana o industrial, en el caso del ingenio demostrado en el punto RM06.

El punto de mayor abundancia de macroinvertebrados bentónicos fue RQH01, sin embargo, esto no significa que el punto presente una buena calidad, ya que los macroinvertebrados encontrados en el punto fueron indicadores de mala calidad según el BMWP-CR.

La zona media representada con los puntos RCH08, RM05, RM07 exhibe las mejores condiciones que la cuenca ofrece debido a que es una zona poco perturbada y con presencia de bosque, sin embargo, es evidente que existe contaminación, aunque en menor cantidad

que en las zonas altas y medias, en donde un mal manejo de los cultivos agrícolas y descargas de aguas residuales sin tratamiento provocan mayores niveles de contaminación.

La microcuenca tiene un porcentaje bajo de urbanismo, sin embargo, presenta un mal manejo ante las descargas de aguas residuales que se ve reflejado en los altos niveles de contaminación fecal en sus ríos. Lo que demuestra como una mala planificación puede llegar a afectar de gran manera los ecosistemas acuáticos.

El uso de suelo alrededor de la cuenca se encuentra alterado debido a los distintos usos que se han dado. Se presenta un mayor impacto agrícola en lo alto de la cuenca que provoca erosión y un aumento de materia orgánica en el agua provocando una disminución en los niveles de oxígeno que afectan las poblaciones de macroinvertebrados bentónicos. Esto sumado a la influencia humana encontrada a lo largo de la cuenca e intensificándose en la parte baja provoca que la cuenca presente contaminación a lo largo del año.

La contaminación constante durante todo el año provoca un aumento en la contaminación del agua y una baja capacidad de reacción por parte de los ríos y sus riberas para recuperarse. Aunque, los ríos de la cuenca, así como los otros ríos del país, tienen una gran resiliencia y por lo tanto la capacidad de recuperarse, los impactos constantes de contaminantes evitan que esto se lleve a cabo.

La zona no cuenta con una regulación eficaz a la hora de dar autorizaciones de uso de suelo, y permite actividad agrícola sin control, que provoca aumentos en la contaminación de las aguas superficiales. De igual manera no se nota un control sobre lo que las industrias vierten sobre el río, como quedó evidenciado con los efectos del Ingenio sobre las aguas.

La mejor forma de determinar la calidad de los ríos es utilizando dos o más índices de calidad que se puedan relacionar entre ellos de una manera integral. El uso de un solo índice puede dar resultados incorrectos, por lo que la utilización de varios índices es más válida.

5. Recomendaciones

Todos los puntos estudiados presentaron algún grado de contaminación, por lo que es necesario establecer un plan responsable de recuperación de la cuenca, en el cual se priorice y planifique la protección de los ríos y quebradas de la misma, promoviendo campañas de educación ambiental y así crear un sentido de responsabilidad en todos los involucrados sobre el efecto dañino que están provocando sobre el río.

Se recomienda un fortalecimiento en el control realizado sobre las descargas directas de aguas contaminadas sobre los ríos y quebradas, ya que estas son las que provocan el mayor daño sobre las aguas y sobre los ecosistemas, promoviendo un incentivo al compromiso de las familias e industrias que implementen algún tipo de tratamiento eficiente ya sea convencional o no convencional como tanques sépticos, humedales artificiales entre otros, que puedan ser aplicados en la zona.

Se recomiendan campañas de reforestación ribereña con especies nativas en la zona, encontradas en la parte media y que sean plantadas principalmente en las riberas de los ríos que permitan una recuperación tanto del suelo como de las aguas, principalmente en puntos como RQH01 y RM06 que presentaron los mayores niveles de contaminación en la cuenca.

Es de alta necesidad que se priorice la creación de un programa de gestión y protección, así como el establecimiento de un presupuesto destinado a la vigilancia de las nacientes y zonas de recarga a través de análisis continuos, puesto que actualmente se están viendo deterioradas a causa de los altos niveles de contaminantes y la falta de una buena gestión, ya que los suelos se encuentran fraccionados debido a todas las actividades que son realizadas en ellos.

La zona presenta distintos usos del suelo que afectan directamente las aguas, por lo que es necesario un mejor ordenamiento territorial que permita control sobre los distintos tipos de cultivos, productos utilizados en la zona. Así también que se lleve a cabo un control sobre las áreas de construcción urbana para mejorar el manejo de los suelos, que se respeten las zonas de protección y evitar que tanto estas como las aguas sigan contaminándose.

6. Bibliografía

- Álvarez, J., Panta, J., Ayala, R. & Acosta, E. 2008. *Calidad Integral del Agua Superficial en la cuenca Hidrológica del Río Amajac*. Información Tecnológica. Vol. 19 (6), 21-32 (2008). 12 pp.
- Ambarita, M.N.D., Lock, K., Boets, P., Everaert, G., Thi, H.T.N., Forio, M.A.E., Musonge, P.L.S., Semjonova, N., Bennetsen, E., Landuyt, D., Dominguez-Granda, L. & Goethals, P.L.M. 2017. *Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices*, Limnologia (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.001>.
- Angulo, F. 2015. *Informe Final sobre Gestión del Recurso Hídrico y Saneamiento en Costa Rica*. Vigésimoprimer Informe Estado De La Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Programa Estado De LA Nación. 47 pp.
- Arango, M., Álvarez, I., Arango, F., Torres, O. & Monsalve, A. 2008. *Calidad del agua de las quebradas La Cristalina y La Risaralda*. Revista Producción Más Limpia. Vol. 3, no 1. 50-60pp.
- Astorga, Y. 2015. *Gestión del Recurso Hídrico. Informe Final*. Decimonoveno Informe Estado de La Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica. 38pp.
- Bolaños, J., Montero, N., Rodríguez, N. & Sánchez, A. 2015. *Calidad de aguas superficiales: estudio de la quebrada Estero, ubicada en el cantón de San Ramón, Costa Rica*. Revista Pensamiento Actual. Vol. 15. No 25, 2015. ISSN 1409-012. 12 pp.
- Bravo, H., McLellan, S., Klump, J., Hamidi, S. & Talarczyk, D. 2017. *Modeling the fecal coliform footprint in a Lake Michigan urban coastal area*. Environmental Modelling & Software 95 (2017) 401-419.
- Brenes, G & Molina, J. 2007. *Evaluación y clasificación preliminar de la calidad del agua de la cuenca del Río Tárcoles y el Reventazón*. Tecnología en Marcha. Vol. 20-2-2007.

- Brenes, G & Molina, J. 2012. *Análisis de la calidad de varios cuerpos de agua superficiales en el GAM y la Península de Osa utilizando en Índice Holandés*. Tecnología en Marcha. Vol. 25. N° 5. 7 pp.
- Burdet, A. & Watts., R.J. 2009. Modifying living space: an experimental study of the influences of vegetation on aquatic invertebrate community structure. *Hydrobiologia* 618: 161–173.
- Comisión para el ordenamiento y manejo de la cuenca del Río Reventazón (COMCURE). 2015. *Plan de Cuenca del Río Reventazón-Parismina*. Programa Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental Unidad de Gestión Nacional, Costa Rica. 196 pp.
- Comisión Nacional de Emergencias (CNE). 2014. *Amenazas Naturales Cantón de Jiménez*. Accesado en línea junio 2016: <http://www.cne.go.cr/Atlas%20de%20Amenazas/JIMENEZ.htm>
- Cruz, K., Brenes, A & Granados, M. 2000. *Grado de Riesgo de Contaminación de los Acueductos Municipales del Cantón de Turrialba*. UNED. Maestría en administración de servicios de Salud Sostenible. 82 pp.
- Custodio, M., Chanamé, F., Pizarro, S & Cruz, D. 2018. *Quality of the aquatic environment and diversity of benthic macroinvertebrates of high Andean wetlands of the Junín region, Peru*. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 44 (2018) 195-202.
- Divya, A. & Solomon, P. 2016. *Effects of some water quality parameters especially total coliform and fecal coliform in Surface water of Chalakudy river*. *Procedia Technology* 24 (2016) 631 – 638.
- Donia, N & Bahgat, M. 2016. Water quality management for Lake Mariout. *Ain Shams Engineering Journal* (2016) 7, 527–54.
- Eaton, A., Clesceri L. & Greenberg A. 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23ed. Washington DC: American Public Health Association.430pp.
- Egler, M., D. F. Buss, J. C. Moreira & Baptista, D.F. 2012. *Influence of agricultural land-use and pesticides on benthic macroinvertebrate assemblages in an agricultural river basin in southeast Brazil*. *Brazilian Journal of Biology* 72 (3): 437-443.
- Fernández, F. (2000). Introducción a la fotointerpretación. Dialnet. Editorial Ariel. Recuperado de: <http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/22660>
- Fernández, V & Londoño, M. 2015. Poliquetos (Annelida:Polychaeta) como indicadores biológicos de contaminación marina: casos en Colombia. *Gestión y Ambiente*. Volumen 18(I): 189-204. Junio de 2015. ISSN 0124.177X.

- Fernández, N., Ramírez, A. & Solano, F. 2008. *Índices fisicoquímicos de calidad del agua: Un estudio comparativo. Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la vida y el desarrollo sostenible*. Universidad del Valle, Instituto CINARA. 308-392 pp.
- Figuroa, R., Valdovinos, C., Araya, E. & Parra, O. 2003. *Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua de ríos del sur de Chile*. Revista Chilena de Historia Natural 76: 275-285, 2003. 10pp.
- Fonseca, A; Madrigal, H., Núñez, C; Calderón, H & Góme, A. 2018. *Evaluación de la amenaza de contaminación potencial al agua subterránea en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica*. En revisión Revista Uniciencia.
- Forio, M., Lock, K., Radam, E., Bande, M., Asio, V & Goethals, P. 2017. *Assessment and analysis of ecological quality, macroinvertebrate communities and diversity in rivers of a multifunctional tropical island*. Ecological Indicators 77 (2017) 228–238.
- Gómez-Anaya, J., Novelo-Gutierrez, R. & Astudillo-Aldana, M. 2017. *Efecto de las descargas domésticas y de beneficio de café sobre la calidad del agua y la diversidad de larvas de Odonata (Insecta) en un arroyo de bosque mesófilo de montaña en Veracruz, México*. Revista Mexicana de Biodiversidad 88 (2017) 372–380.
- Gómez-Duarte, O. 2018. *Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública*. Rev. Fac. Med. 2018 Vol. 66 No. 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.70775>.
- Guerrero-Bolaño, F., Manjarrés-Hernández, A., & Núñez-Padilla, N. 2003. *Los macroinvertebrados bentónicos de pozo azul (cuenca del Río Gaira, Colombia) y su relación con la calidad del agua*. Acta Biológica Colombiana, Vol. 8 No. 2, 2003 43.
- Hernández, B., Alejo, I & María, M. 2015. *Determinación de calidad de agua y estudio batimétrico en la presa de la purísima y la laguna de Yuriria del Estado de Guanajuato*. Vol.1. No 3, Jóvenes Investigadores, 2015. 34 pp.
- Hernández, L., Chamizo, H & Mora, D. 2011. *Calidad del agua para consumo humano y salud: dos estudios de caso en Costa Rica*. Revista Costarricense de Saludo Pública N° 1. 2011; 20: 21-26.
- Hussein, S. & Ali, S. 2017. *Water quality index for Al-Gharraf River, Southern Iraq*. Egyptian Journal of Aquatic Research (2017).
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Política Nacional de Agua Potable de Costa Rica 2017 – 2030. / Comisión Interinstitucional. San José, Costa Rica. AyA: 2016.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2008. *El clima, su variabilidad y el cambio climático en Costa Rica, 2008*. Accesado en línea mayo 2016:

http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf

- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2013. *Precipitación total media anual por meses en Cartago, Costa Rica, 2013*. Accesado en línea abril 2016 http://www.imn.ac.cr/IMN/MainAdmin.aspx?_EVENTTARGET=ClimaCiudad&CIUDA D=10.
- Islam, M., Sokolova, E. & Hofstra, N. 2018. *Modelling of river faecal indicator bacteria dynamics as a basis for faecal contamination reduction*. Journal of Hydrology 563 (2018) 1000–1008.
- Jiménez, M. 2010. *Intervenciones basadas en la planificación y gestión territorial de los riesgos del agua y medio ambiente con enfoque de multiculturalidad y género en el cantón de Jiménez, Cartago, Costa Rica*. Tesis de Maestría en Artes en Planificación y Gestión Territorial de los Riesgos, del Agua del Medio Ambiente con Enfoque de Multiculturalidad y Género. ICAP. Guatemala. 162 pp.
- Jiménez, M. & Vélez, M. 2006. *Análisis Comparativo de Indicadores De La Calidad De Agua Superficial*. Avances en Recursos Hidráulicos. Número 14, octubre de 2006. Medellín. ISSN 0121-5701. 19pp.
- Kranzfelder, P & Leonard, C. 2018. *Diversidad de especies de Chironomidae (Diptera) de estuarios en un gradiente de uso de suelo en la costa Caribe de Costa Rica*. Revista de Biología Tropical, vol. 66, no. 3, 2018, p. 1118+.
- Liévano, A. & Ospina, R. 2007. *Guía ilustrada de los macroinvertebrados acuáticos del río Bahamón*. Bogotá D.C. Universidad El Bosque e Instituto Alexander Von Humboldt. Bogotá, D. C. 130 pp.
- Liu, W., Chan, W. & Young, C. 2015. *Modeling fecal coliform contamination in a tidal Danshuei River estuarine system*. Science of the Total Environment 502 (2015) 632–640.
- Ludwig, J. & Reynolds, J. F. 1988. *Statistical ecology: a primer in methods and computing (Vol. 1)*. John Wiley & Sons. Canada. 310 pp.
- Luo, K., Hu, X., He, Q., Wu, Z., Cheng, H., Hu, Z. & Mazumder, A. 2017. *Impacts of rapid urbanization on the water quality and macroinvertebrate communities of streams: A case study in Liangjiang, New Area, China*. Science of the Total Environment.
- Marín, R. 2012. *Características Físicas, Químicas y Biológicas de las Aguas*. Empresa Municipal de Aguas de Córdoba, España. 43 pp.
- Marroquín, L. 2013. *Calidad de Agua Superficial*. Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de Agronomía. Centro de Telemática. 11pp.

- Martínez-Bastida, J., Araúzo, M. & Valladolid, M. 2007. *Caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del Oja-Tirón*. Procesos de contaminación. Limnética, 26 (2): 219-232 (2007). Asociación Ibérica de Limnología, Madrid. España. ISSN: 0213-8409.
- Martínez-Santos, M., Lanzén, A., Unda-Calvo, J., Martín, I., Garbisu, C. & Ruiz-Romera, E. 2018. *Links between data on chemical and biological quality parameters in wastewater-impacted river sediment and water samples*. Data in Brief 19 (2018) 616–622
- Martins, R.T., Couceiro, S.R.M., Melo, A.S., Moreira, M.P. & Hamada, N. 2017. *Effects of urbanization on stream benthic invertebrate communities in Central Amazon*. Ecol. Indic. 73, 480–491.
- Mena-Rivera, L & Quirós-Vega, J. 2018. Assessment of drinking water suitability in low income rural areas: a case study in Sixaola, Costa Rica. Journal of Water and Health. 16.3. 2018.
- Mena-Rivera, L., Vásquez-Bolaños, O., Gómez-Castro, C., Fonseca-Sánchez, A., Rodríguez-Rodríguez, A. & Sánchez-Gutiérrez, R. 2018. *Ecosystemic Assessment of Surface Water Quality in the Virilla River: Towards Sanitation Processes in Costa Rica*. Water. 10(7):845. doi: 10.3390/w10070845.
- Meza-S, A., G-Dias, L. & M-Walteros, J. 2012. *Calidad de Agua y Composición de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca alta del río Chinchiná*. Caudasia 34(2):443-456. 2012.
- MINAE. 1996. *Ley Forestal N° 7575*. La Gaceta N° 72, San José, Costa Rica.
- MINAE. 2007. *Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales*. Establecido por el Decreto Ejecutivo n° 33903-MINAE-S.
- Misaghi, F., Delgosha, F., Razzaghmanesh, M. & Myers, B. 2017. *Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: A case study of the Ghezal Ozan River*. Science of the Total Environment. 2017.
- Montero-Sánchez, E., Araya-Rojas, A., Granados, L. & Rueda, D. 2016. Autonomous Adaptation to Extreme Hydrometeorological Events: A Case Study of the Coexistence of an Indigenous Territory with Climate Risk at the Sixaola Basin, Costa Rica. Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci). EISSN: 2215-3896. Vol 50(2): 20-37.
- Mora, D. 2004. *Calidad microbiológica de las aguas superficiales en Costa Rica*. Revista Costarricense de Salud Pública. 2004; 13:1-14.
- Mora, D. & Portuguez, F. 2011. *Calidad del agua en sus diferentes usos en Guanacaste, Costa Rica*. Informe Laboratorio Nacional de Aguas, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. 25pp.

- Mora-Alvarado, D. & Portuguese-Barquero, C. 2018. Agua para consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2016. Metas al 2022 y al 2030. *Tecnología en Marcha*. Vol. 31-2. Abril-junio 2018. Pág 72-86.
- Nazeer, S., Hashmi, M.Z. & Malik, R.N., 2014. *Heavy metals distribution, risk assessment and water quality characterization by water quality index of the River Soan, Pakistan*. *Ecol. Indic.* 43, 262–270.
- Oviedo-Machado, N & Reinoso-Flores, G. 2018. *Aspectos ecológicos de larvas de Chironomidae (Diptera) del río Opia (Tolima, Colombia)*. *Revista Colombiana de Entomología* 44 (1): 101-109 (Enero - Junio 2018). DOI: 10.25100/socolen.v44i1.6546.
- Pan, B.-Z., Wang, Z.-Y., Li, Z.-W., Lu, Y.-J., Yang, W.-J., Li, Y.-P., 2015. *Macroinvertebrate assemblages in relation to environments in the West River, with implications for management of rivers affected by channel regulation projects*. *Quat. Int.* 384, 180–185.
- Peinador, M. 2004. *Relación entre los Macroinvertebrados bénticos y la Calidad del agua en Ríos de Costa Rica*. *Revista Evolución*. Vol.2 N°2. 2004. 18 pp.
- Peña, W. 2017. *Modelo de Estimación Para El Uso De Agua Del Río Bogotá, Basado En El Análisis De Vertimientos En Aguas Superficiales*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones Énfasis en Teleinformática Bogotá, Colombia noviembre de 2017.
- Polanco, J. 2016. *El papel del análisis por componentes principales en la evaluación de redes de control de la calidad del aire*. *Comunicaciones en Estadística*. Agosto 2016, Vol. 9, No. 2, pp. 271-294.
- Pulido, M., Ávila, S., Estupiñán, S. & Gómez, A. 2015. *Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua*. *Revista Nova*. Publicación científica ISSN:1794-2470 vol.3 no. 4 julio-diciembre de 2015:1-116.
- Quirós, J. 2011. *Aplicación del Índice Biológico BMWP-CR en tres estaciones de muestreo de los Ríos Barranca y la paz, Costa Rica*. *Revista Hidrogénesis* Vol.7. N°2. 2009. ISSN 1659-1968.
- Ramos-Merchante, A. & Prenda, J. 2017. *Macroinvertebrate taxa richness uncertainty and kick sampling in the establishment of Mediterranean rivers ecological status*. *Ecological Indicators* (2017) 1–12
- Reder, K., Flörke, M. & Alcamo, J. 2015. *Modeling historical fecal coliform loadings to large European rivers and resulting in-stream concentrations*. *Environmental Modelling & Software* 63 (2015) 251-263.
- Reyes-Morales, F. & Springer, M. 2014. *Efecto del esfuerzo de muestreo en la riqueza de taxones de macroinvertebrados acuáticos y el índice BMWP/Atilán*. *Revista Biología Tropical*. (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744) Vol. 62 (Supl. 2): 291-301.

- Reyes, P. & Torres-Florez, J. 2009. *Diversidad, distribución, riqueza y abundancia de condrictios de aguas profundas a través del archipiélago patagónico austral, Cabo de Hornos, Islas Diego Ramírez y el sector norte del paso Drake*. Revista de Biología Marina y Oceanografía 44(1): 243-251, abril de 2009.
- Ribeiro, K. H., Favaretto, N., Dieckow, J., De Paula Souza, L.C., Gomes Minella, J.P., De Almeida, L. & Ribeiro-Ramos, M.. 2014. *Quality of surface water related to land use: a case study in a catchment with small farms and intensive vegetable crop production in southern Brazil*. Revista Brasileira de Ciência do Solo 38 (2): 656-668.
- Rincón, Y., Daza, D. & Castrillón, W. 2011. *Diagnóstico actual de los parámetros fisicoquímicos como indicadores de contaminación ambiental en el río Apulo, Cundinamarca-Colombia*. Revista Tecnura. Volumen 15. N° 28. 53-76.
- Rincón-Silva, N. 2017. *Evaluación de parámetros físico-químicos del agua en el proceso de potabilización del río Subachoque*. Revista Tecnogestión. Vol. 13, Núm. 1 (2017).
- Rodríguez, M., Príncipe, E., Márquez, J. y Raffini, G. 2017. *Diversidad de macroinvertebrados fitófilos en arroyos de cabecera en pastizales de altura en Córdoba, Argentina*. Revista Mexicana de Biodiversidad 88 (2017) 853-859.
- Roldán, M. 1995. *Los macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua en Colombia: Estado actual y perspectivas*. Biología, 4, 11.
- Rosa B, Rodrigues L, de Oliveira G, da Gama Alves R. 2014. *Chironomidae and Oligochaeta for water quality evaluation in an urban river in southeastern Brazil*. Environmental Monitoring and Assessment, 186(11): 7771-7779.
- Rosas-Acevedo, J., Ávila-Pérez, H., Sánchez-Infante, A., Rosas-Acevedo, R., García-Ibáñez, S., Sampedro-Rosas, L., Granados-Ramírez, J. & Juárez-López, A. 2014. *Índice BMWP, FBI y EPT para determinar la calidad del agua en la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero, México*. Revista Iberoamericana de Ciencias. Vol. 1. N° 2. ISSN 2334-2501.
- Samaniego, N. 2013. *Análisis de vulnerabilidad en zonas potenciales de recarga hídrica por efectos de cambios de uso de suelo y por variabilidad climática en la Microcuenca del Río Purires, Costa Rica*. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 143 p.
- Sánchez, R., Cornejo, A., Boyero, L. & Santos, A. 2010. *Evaluación de la Calidad del Agua en la cuenca del Río Capira, Panamá*. Tecnociencia, vol. 12, N° 2. 15 pp.
- Santana, M. & Mejía, E. 2010. *Diagnóstico de la contaminación por aguas residuales domésticas, cuenca baja de la quebrada La Macana, San Antonio de Prado*. Municipio de Medellín. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. 68pp.
- Saravanakumar, K. & Kumar, R. 2011. *Analysis of water parameters of groundwater near Ambattur industrial area, Tamil Nadu, India*. Indian Journal of Science and Technology.

- Sharifinia, M., Mahmoudifard, A., Imanpour, J., Ramenzanpour, Z. & Kong, C. 2016. *Pollution evaluation in the Shahrood River: Do physico-chemical and macroinvertebrate-based indices indicate same responses to anthropogenic activities*. Chemosphere 159 (2016): 584-594.
- Segnini, S. 2003. *El Uso de los Macroinvertebrados Bentónicos como indicadores de la condición ecológica de los cuerpos de agua corriente*. Ecotrópicos 16(2): 45-63. 19 pp.
- Şener, Ş., Şener, E. & Davraz, A. 2017. *Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey)*. Science of the Total Environment 584–585 (2017) 131–144.
- Serrato, V. 2015. *Calidad ambiental del ecosistema ribereño asociado a la parte alta del río Virilla en Vázquez de Coronado, San José, Costa Rica*. Universidad Nacional de Costa Rica. Trabajo de Graduación. 2015.
- Sivaraja, R. & Nagarajan, K., 2014. *Levels of indicator microorganisms (total and fecal coliforms) in surface waters of rivers Cauvery and Bhavani for circuitously pre-dicting the pollution load and pathogenic risks*. Cell 6, 455–461.
- Springer, M. 2010. Trichoptera. Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744) Vol. 58 (Suppl. 4): 151-198.
- Springer, M. 2010. *Biomonitoreo Acuático*. Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744) Vol. 58 (Suppl. 4): 53-59.
- Springer, M., Ramirez, A. & Hanson, P. (2010). *Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I*. Rev. Biol. Trop. 58 (Suppl. 4).
- Sun, W., Xia, C., Xu, M., Guo, J. & Sun, G. 2016. *Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River*. Ecological Indicators 66 (2016) 306–312.
- Taco-Taco, C., Vistín-Chacán, G., Roselo-Orozco, V., López-Bravo, O & Fonseca-Torres, W. 2017. *Las actividades productivas y su relación con la contaminación del agua de la Microcuenca Negroyacu, en Guaranda, Ecuador*. Revista Ciencia UNEMI. Vol. 10, N° 22, abril 2017, pp. 88 – 97. ISSN 1390-4272 Impreso. ISSN 2528-7737 Electrónico.
- Torres, P. 2009. *Índices de calidad de aguas en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica*. Revista Ingeniería. Universidad de Medellín, vol 8, no 15. 79-94 pp.
- Uribe, M. & Roldán, R. 1975. *Aspectos bioecológicos de la calidad del agua*. Revista Ecotrópica, 3, 6.

- US Environmental Protection Agency (EPA). 2003. *Rapid Bioassessment Methodology for Rivers and Streams*. Watershed Academy. ISBN 0 7306 7637 4. 90 pp.
- Vanzela, L., Hernández, F., & Franco, R. 2010. *Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, On-line version ISSN 1807-1929, 14 (1), 55-64, 2010.
- Villamarín, C., Prat, N. & Rieradevall, M. 2014. *Caracterización física, química e hidromorfológica de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú*. Lat. Am. J. Aquat. Res., 42(5): 1072-1086, 2014. DOI: 10.3856/vol42-issue5-fulltext-12.
- Wei, S., Xia, C., Xu, M., Guo, J. & Sun, G. 2016. *Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River*. Ecological Indicators 66 (2016) 306–312.
- Whitehead, P., Gianbattista, B., Hossain, M., Dolk, M., Das, P., Comber, S., Peters, R., Charles, K., Hope, R. & Hossain, S. 2018. *Restoring water quality in the polluted Turag-Tongi-Balu river system, Dhaka: Modelling nutrient and total coliform intervention strategies*. Science of the Total Environment 631–632 (2018) 223–232.
- Zhen-Wu, B., Valverde, C., Valiente, C. & Jiménez, F. 2009. *Evaluación de la calidad del agua como base para la formulación del plan de cogestión del recurso hídrico en la microcuenca de la quebrada Victoria, Costa Rica*. Comunicación Técnica. Recursos Naturales y Ambiente. No.56-57: 134-142.