

**REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA PARA ESTABLECER EL EFECTO  
DEL USO DEL SUELO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA EN ECOSISTEMAS  
DE ALTA MONTAÑA**

**ANGIE YURLEY GÜIZA DIAZ  
DARLING DANIELA PEREA LEÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2019**

**REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA PARA ESTABLECER EL EFECTO  
DEL USO DEL SUELO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA EN ECOSISTEMAS  
DE ALTA MONTAÑA**

**ANGIE YURLEY GÜIZA DIAZ  
DARLING DANIELA PEREA LEÓN**

**Trabajo de grado modalidad Investigativa para optar al título de: Ingeniera  
Civil**

**Director  
EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA  
PhD. en Ingeniería, área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2019**

## CONTENIDO

|                                                                                                              | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                           | 12   |
| 1 METODOLOGÍA .....                                                                                          | 14   |
| 1.1 BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA .....                                                                             | 14   |
| 1.2 FILTRADO DE DOCUMENTOS .....                                                                             | 15   |
| 1.3 ORGANIZACIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS DATOS .....                                                             | 16   |
| 1.4 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DOCUMENTOS .....                                                              | 16   |
| 2. RESULTADOS Y DISCUSION .....                                                                              | 18   |
| 2.1 REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA.....                                                                  | 18   |
| 2.1.1 Resultados de Filtrado y selección .....                                                               | 18   |
| 2.1.2 Evolución y estado actual de la información .....                                                      | 19   |
| 2.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EVALUADOS EN LA CALIDAD DEL<br>AGUA.....                                       | 22   |
| 2.2.1 Contaminantes y su transporte .....                                                                    | 23   |
| 2.2.2 Actividades agrícolas y pecuarias.....                                                                 | 28   |
| 2.2.2.1 Frecuencias de parámetros fisicoquímicos relacionados con actividades<br>agrícolas y pecuarias ..... | 30   |
| 2.2.2.2 Valores de referencia de parámetros fisicoquímicos .....                                             | 32   |
| 2.3 METODOLOGÍAS EMPLEADAS .....                                                                             | 38   |
| 2.3.1 Mediciones sobre las fuentes superficiales.....                                                        | 38   |
| 2.3.2 Modelos empleados.....                                                                                 | 41   |
| 3. CONCLUSIONES .....                                                                                        | 58   |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                                                                           | 61   |
| ANEXOS .....                                                                                                 | 70   |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                          | <b>Pág.</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1. Filtrado de documentos .....                                                                   | 19          |
| Figura 2. Evolución y estado actual de la información (n=59 documentos). ....                            | 20          |
| Figura 3. Distribución de los artículos por país de estudio (n=59 estudios) .....                        | 21          |
| Figura 4. Distribución de los artículos seleccionados por continente de estudio<br>(n=59 estudios) ..... | 21          |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                       | <b>Pág.</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1. Frecuencia de la precipitación media anual en los estudios que la reportan (n=30) .....                      | 24          |
| Tabla 2. Frecuencia de la vegetación mencionada en los diferentes documentos (n=30) .....                             | 25          |
| Tabla 3. Frecuencia de los tipos de suelo mencionados en los diferentes documentos (n=26) .....                       | 26          |
| Tabla 4. Frecuencia de la topografía mencionada en los diferentes documentos (n=30) .....                             | 27          |
| Tabla 5. Frecuencia de los cultivos mencionados en los diferentes documentos (n=14) .....                             | 28          |
| Tabla 6. Frecuencia de ganado mencionado en los diferentes artículos (n=12) ....                                      | 29          |
| Tabla 7. Frecuencia de parámetros estudiados en las fuentes superficiales por actividades agrícolas y pecuarias ..... | 31          |
| Tabla 8. Frecuencias de las mediciones realizadas en los documentos (n=21 estudios) .....                             | 39          |
| Tabla 9. Tabla resumen de modelos de calidad del agua.....                                                            | 56          |

## LISTA DE ANEXOS

|                                                                                              | <b>Pág.</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Anexo A. Esquema de organización de artículos en la herramienta X-Mind .....                 | 70          |
| Anexo B. 59 documentos seleccionados .....                                                   | 71          |
| Anexo C. Proceso de revisión .....                                                           | 75          |
| Anexo D. Frecuencia de los parámetros estudiados discretizando la temporada de estudio ..... | 76          |
| Anexo E. Parámetros más estudiados .....                                                     | 77          |
| Anexo F. Valores máximos y mínimos de los parámetros encontrados .....                       | 78          |
| Anexo G. Características generales de un modelo de simulación .....                          | 79          |
| Anexo H. Proceso de simulación de una corriente hídrica superficial .....                    | 80          |
| Anexo I. Diagrama del proceso de calibración del modelo .....                                | 81          |

## RESUMEN

**Titulo:** Revisión sistemática de literatura para establecer el efecto del uso del suelo sobre la calidad del agua en ecosistemas de alta montaña.\*

**Autores:** Angie Yurley Güiza Díaz  
Darling Daniela Perea León\*\*

**Palabras Clave:** Uso de la tierra, Actividades agrícolas y pecuarias, Metodologías, Parámetros fisicoquímicos.

Las proximidades del uso de la tierra a las orillas de las corrientes tienen fuertes impactos negativos sobre la calidad del agua, sobre todo por la intensificación de las actividades agrícolas y pecuarias, lo que genera contaminación en las corrientes y aumenta la producción de los desechos. Este trabajo establece una relación entre las actividades agrícolas y pecuarias y el efecto en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos que determinan la calidad del agua. Así mismo, analiza diferentes metodologías empleadas para evaluar el efecto de las actividades agrícolas y pecuarias sobre la calidad del agua de las fuentes superficiales. Para tal efecto, se realizó una revisión sistemática de documentos científicos que fueron sometidos a un proceso de búsqueda, selección y análisis arrojando como resultado 59 artículos relevantes. Se encontró que los parámetros más destacados para estudiar la influencia son: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nitratos, Nitritos, temperatura y fósforo total. Así mismo se encontró que las características de la cuenca como la topografía, el suelo, la vegetación y la precipitación influyen en la calidad de las corrientes. En cuanto a las metodologías empleadas se evidenciaron los puntos y tiempos de monitoreo, profundidad de recolección y el tipo de muestreo realizado, así como los modelos más utilizados en ecosistemas de alta montaña para el análisis de la calidad del agua, los parámetros modelados en cada una de ellos y los datos de entrada necesarios para su funcionamiento.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña Ingeniero Sanitario, MSc., PhD.

## ABSTRACT

**Title:** Systematic review of literature to establish the effect of land use on water quality in high mountain ecosystems.\*

**Authors:** Angie Yurley Güiza Díaz  
Darling Daniela Perea León \*\*

**Keywords:** Land use, Agricultural and livestock activities, Methodologies, Physico-chemical parameters.

The proximity of the use of the land to the stream banks has strong negative impacts on water quality, mainly due to the intensification of the agricultural and cattle activities, which generates pollution in the streams and increases waste production. This work establishes a relationship between agricultural and livestock activities and the effect on the behavior of the physicochemical parameters that determine water quality. Likewise, it analyzes different methodologies used to evaluate the effect of agricultural and livestock activities on the water quality of surface sources. For this purpose, a systematic review of scientific documents was carried out, which were subjected to a search, selection and analysis process, resulting in 59 relevant papers. It was found that the most relevant parameters to study the influence are: pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, nitrate, Nitrites, temperature and total phosphorus. It was also found that the characteristics of the basin such as topography, soil, vegetation and precipitation influence the water quality. Regarding the methodologies used, the points and times of monitoring, the depth of collection and the type of sampling performed were identified, as well as the most used models in high mountain ecosystems for the analysis of water quality, the parameters modeled in each one of them and the input data necessary for its operation.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña Ingeniero Sanitario, MSc., PhD.

## INTRODUCCIÓN

En los ecosistemas de alta montaña se encuentran los principales nacimientos de los recursos hídricos<sup>1</sup>. En dichos ecosistemas la calidad del agua es muy buena y el flujo base es alto y sostenido<sup>2</sup>. Estas fuentes de agua superficial son las encargadas de abastecer en gran medida a las comunidades<sup>3 4</sup>, y son hábitats de gran diversidad biológica por tanto poseen un gran valor y es de suma importancia preservarlos<sup>5</sup>.

El proceso de adaptación de las tierras y el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias intensificadas en zonas consideradas frágiles, generan diferentes fenómenos como la erosión de los suelos, así mismo la escorrentía superficial contribuye con el transporte de agentes contaminantes y sedimentos hacia las corrientes, afectando la calidad de las fuentes de agua<sup>6</sup>. De igual forma, la acumulación de residuos orgánicos y nutrientes en las aguas superficiales causan la proliferación de vegetación, alterando parámetros fisicoquímicos del agua, propiciando su eutrofización y afectando su calidad<sup>7</sup>.

---

<sup>1</sup> R. DE COLOMBIA MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE et al., "Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña colombiana," Prim. Edición Bogotá D.C, 2002

<sup>2</sup> BUYTAERT W. et al., "Human impact on the hydrology of the Andean páramos," *Earth-Science Rev.*, vol. 79, no. 1–2, pp. 53–72, Nov. 2006

<sup>3</sup> WAITE T. D., "Introduction to Water Quality Concepts," in *Principles of Water Quality*, Elsevier, 1984, pp. 1–9

<sup>4</sup> MOURI G., TAKIZAWA S., and OKI T., "Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact," *J. Environ. Manage.*, vol. 92, no. 7, pp. 1837–1848, Jul. 2011

<sup>5</sup> R. DE COLOMBIA MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE op. Cit.

<sup>6</sup> HE Z., WENG H., HO H.-C., RAN Q., and MAO M., "Soil erosion and pollutant transport during rainfall-runoff processes," *Water Resour.*, vol. 41, no. 5, pp. 604–611, Sep. 2014

<sup>7</sup> OTERO J. D., FIGUEROA A., MUÑOZ F. A., and PEÑA M. R., "Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area," *Ecol. Eng.*, vol. 37, no. 12, pp. 2035–2043, Dec. 2011

El propósito de esta investigación es realizar una revisión sistemática de literatura que permita la recopilación y análisis de documentos existentes para establecer los efectos generados sobre la calidad del agua al desarrollar actividades agrícolas y pecuarias en ecosistemas de alta montaña. Además, se analizan los parámetros fisicoquímicos más susceptibles de alteración asociados a estos usos del suelo<sup>8</sup>, e identifican diferentes metodologías que permiten evaluar la calidad de las fuentes superficiales<sup>9</sup>.

Este tipo de estudios contribuye con la búsqueda de soluciones para analizar la contaminación de fuentes superficiales en ecosistemas de alta montaña, y ser base para posibles estudios futuros a realizar en dichos ecosistemas, los cuales son fundamentales en el abasteciendo de diversas comunidades en una determinada región<sup>10</sup>, estableciendo posibles alteraciones generadas por las actividades antropogénicas ejecutadas alrededor ellos<sup>11 12</sup>.

---

<sup>8</sup> CASTRO HUERTAS M. Andrea, "Aplicación del QUAL2Kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de caldas Colombia.," 2015

<sup>9</sup> *Ibíd.*

<sup>10</sup> BUYTAERT W., DECKERS J., and WYSEURE G., "Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo)," *Geomorphology*, vol. 73, no. 3–4, pp. 207–221, Feb. 2006

<sup>11</sup> DE SOUZA M. M. and GASTALDINI M. do C. C., "Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos," *Eng. Sanit. e Ambient.*, vol. 19, no. 3, pp. 263–274, Sep. 2014

<sup>12</sup> VAN DER HOVEN C., UBOMBA-JASWA E., VAN DER MERWE B., LOUBSER M., and ABIA A. L. K., "The impact of various land uses on the microbial and physicochemical quality of surface water bodies in developing countries: Prioritisation of water resources management areas," *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 8, pp. 280–289, Dec. 2017

## **1. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo del proyecto se realizó una revisión sistemática de literatura que permitió la evaluación y análisis de información disponible respecto a una temática particular, en este caso, evaluar los efectos sobre la calidad del agua al desarrollar actividades agrícolas y pecuarias en ecosistemas de alta montaña, con el fin de proporcionar una síntesis de las investigaciones existentes para dar paso a proyectos futuros<sup>13</sup>.

### **1.1 BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA**

Para iniciar con el proceso de investigación fue necesario profundizar en definiciones y conceptos que abarcaban de forma general el tema. Posteriormente, se inició la búsqueda de documentos en las bases de datos electrónicas disponibles en el catálogo bibliográfico de la Universidad Industrial de Santander - UIS como: Science Direct, Scopus y Web of Science, sumado a estas, se utilizaron otras fuentes de información como Google Scholar y Scielo, en la búsqueda se emplearon ciertas palabras clave como: “land use”, “use of soil”, “high mountain”, “water quality”, “modeling”, “anthropogenic”, “moorland”, “impact methodology”, “páramo” y “microbiological”.

---

<sup>13</sup> RUDAS J. S., GÓMEZ L. M., and TORO A. O., Prospectiva (Universidad Autonoma del Caribe - Colombia). Universidad Autonoma del Caribe, 2013

## 1.2 FILTRADO DE DOCUMENTOS

Una vez terminado el proceso de búsqueda, se dio inicio a la selección de documentos que presentaban información de las metodologías y parámetros fisicoquímicos empleados para la evaluación de la calidad del agua en función de las actividades agrícolas y pecuarias en ecosistemas de alta montaña, teniendo en cuenta:

- Título del artículo

El primer filtro implementado fue el título de los artículos los cuales debían estar relacionados con la temática del proyecto.

- Año de publicación del artículo

Luego de filtrar los artículos por su título, se tuvieron en cuenta solo los publicados en los últimos 24 años (investigaciones más recientes), por lo que se consideraron del año 1994 al 2018.

- Resumen y contenido general

En primer lugar, con el fin de conocer los artículos, se inició con la lectura del resumen y se seleccionaron los relacionados con la temática a estudiar. Así mismo, se realizó la lectura total de los artículos y se tuvieron en cuenta aquellos que contenían información importante sobre la investigación a desarrollar.

- Parámetros fisicoquímicos y metodologías de calidad del agua

Luego de tener seleccionados los artículos afines con la temática, se realizó la identificación y clasificación de documentos relacionados con diferentes parámetros

fisicoquímicos y metodologías que han sido implementadas para la evaluación de la calidad de agua por efectos del uso del suelo en fuentes superficiales en ecosistemas de alta montaña.

### **1.3 ORGANIZACIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS DATOS**

Para la sistematización de la información recolectada, se emplearon diferentes aplicaciones y herramientas como Mendeley que permite gestionar las referencias bibliográficas y proporciona la facilidad de búsqueda (título, fecha, autor, etc.). De igual modo, se utilizó el software Excel que permitió organizar y tabular la información más relevante de cada documento, empleando diferentes hojas de cálculo. Así mismo, se realizaron diferentes representaciones gráficas para presentar información relevante de las investigaciones. Por medio de la herramienta X-Mind se facilitó el análisis de los documentos con la implementación de mapas conceptuales, los cuales permitieron un enfoque global de todos los documentos recolectados (Anexo 1).

### **1.4 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DOCUMENTOS**

En la revisión se identificaron los artículos de acuerdo con el objetivo que se planeaba cumplir; inicialmente se analizaron los documentos relacionados con el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias las cuales generan impactos sobre los parámetros fisicoquímicos en las fuentes superficiales. De otro lado, se estudiaron los documentos que contenían investigaciones sobre modelos hidrológicos empleados en la evaluación de la calidad del agua. En este proceso de revisión se observaron y analizaron investigaciones realizadas en zonas de alta montaña e igualmente se encontraron artículos sobre el análisis de la calidad del agua en otros tipos de zonas, los cuales se tuvieron en cuenta para el desarrollo de

proyecto de investigación por la valiosa información que presentaban. Así mismo, se encontraron documentos con revisiones sistemáticas de literatura sobre metodologías empleadas para la evaluación del agua.

Seguidamente se clasificó la información de forma general, discretizando los datos de la siguiente manera: lugar de estudio de cada investigación, elevación, clima, actividades antropogénicas desarrolladas, tipos de cultivos, zonas de monitoreo puntuales o distribuidas a lo largo de las corrientes, tiempo de monitoreo, profundidad de recolección de la muestra. Por otro lado, se tabuló información con los valores de cada uno de los parámetros fisicoquímicos presentados en cada artículo, teniendo en cuenta el periodo (seco o húmedo) y la zona en la cual se tomaron las respectivas muestras (i.e. aguas arriba o debajo del área con actividad agrícola y pecuaria). Se aplicaron métodos estadísticos descriptivos a la información tabulada implementando tablas de frecuencias y clasificando los valores máximos y mínimos.

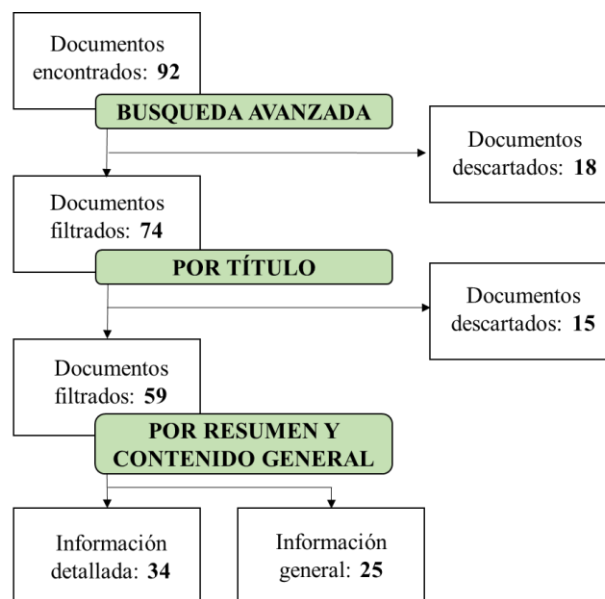
En cuanto a los modelos empleados para la simulación de la calidad del agua, se tabuló información sobre el software empleado para su desarrollo, zonas de implementación, parámetros simulados por el modelo, datos de entrada necesarios para su ejecución, información sobre los procesos de calibración y validación. Finalmente, se determinaron los resultados y conclusiones de cada investigación.

## 2. RESULTADOS Y DISCUSION

### 2.1 REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA

**2.1.1 Resultados de Filtrado y selección** Inicialmente, se realizó un filtro empleando palabras claves y revisando el año de publicación, obteniendo 92 documentos. A partir de esto, por medio del título de cada artículo se eligieron 74 documentos; luego de la lectura del resumen y del contenido general se seleccionaron finalmente 59 documentos (Anexo 2), que serían sometidos al proceso de análisis y clasificación según su contenido sobre parámetros fisicoquímicos y metodologías para la evaluación de la calidad del agua. Del análisis de los documentos seleccionados, 34 artículos contenían información detallada de los parámetros que se estudiaron en los recursos hídricos por la influencia del uso del suelo y las metodologías aplicadas en la evaluación de la calidad del agua, los 25 documentos restantes proporcionaban información general que era útil para comprender la influencia del uso del suelo y las características del sitio de estudio (suelo, topografía, precipitación media anual y vegetación) sobre la calidad del agua en los recursos hídricos. En la Figura 1 se representa el proceso de filtrado para la revisión sistemática.

**Figura 1. Filtrado de documentos**

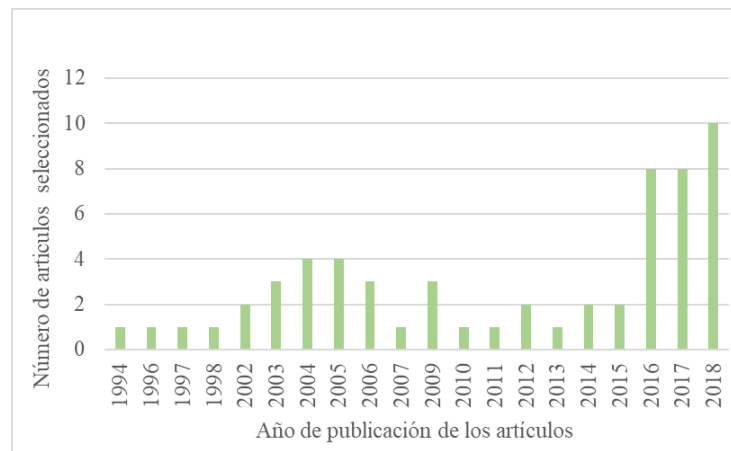


De los 34 documentos que contenían información detallada, 17 artículos presentaban valores de parámetros fisicoquímicos en zonas con desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias y 17 artículos proporcionaban información de los modelos que han sido empleados para la evaluación de la calidad del agua (Ver Anexo 3).

**2.1.2 Evolución y estado actual de la información** Con la revisión de literatura y el análisis de la información se determinó el progreso en el campo de investigación del área a estudiar y el estado actual de la información, siendo estos indicadores del avance de las investigaciones. Teniendo en cuenta la documentación encontrada y seleccionada se observa que en los años 90 al año 2000 las investigaciones realizadas fueron menores, pero se ve reflejado el interés de los investigadores de Reino Unido y China en el análisis de la calidad del agua de diferentes fuentes. Durante los años 2000 al 2010 se encontraron en total 21 artículos publicados, evidenciando un avance significativo.

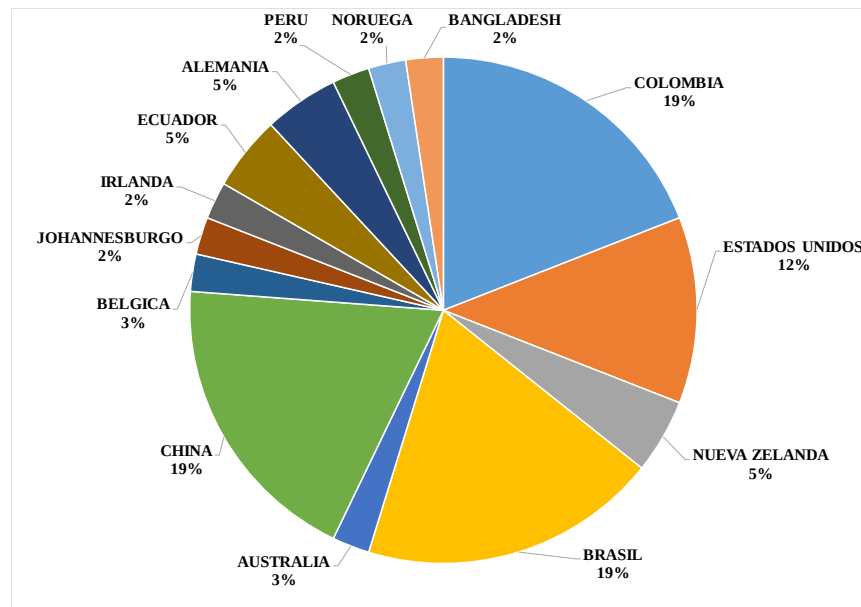
En los últimos 8 años las investigaciones han crecido notoriamente, especialmente en el 2018, año en el cual se han publicado alrededor de 10 documentos donde se presentan métodos más avanzados para realizar las investigaciones. En la Figura 2 se representa el número de documentos encontrados desde el año 1994 hasta el 2018.

**Figura 2. Evolución y estado actual de la información (n=59 documentos).**

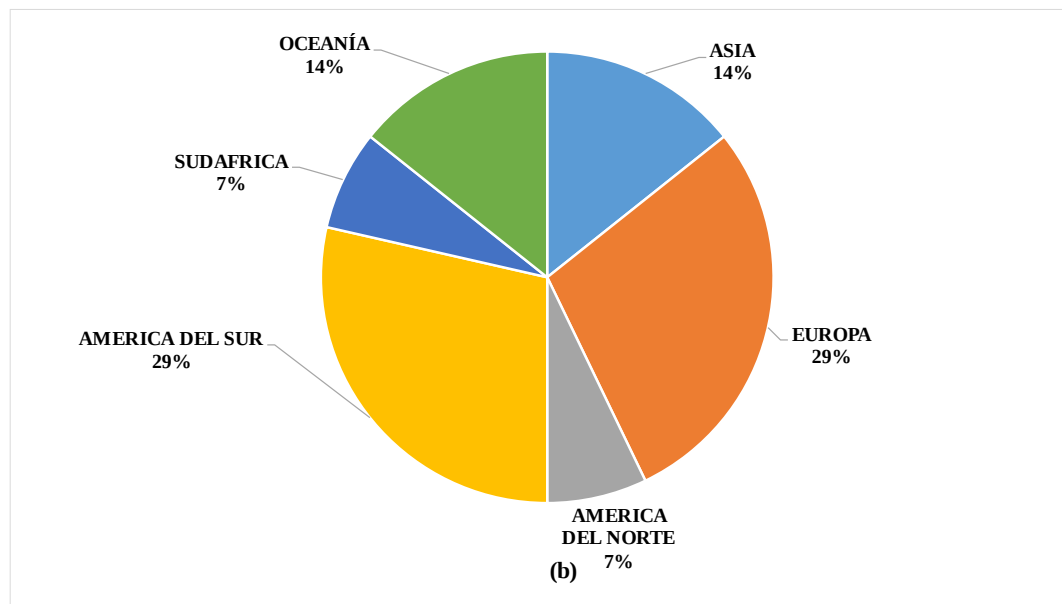


Las Figuras 3 y 4 muestran la cantidad de artículos por país y continente encontrados y además seleccionados por incluir investigaciones sobre estudios de calidad del agua por efectos del uso del suelo (actividades agrícolas y pecuarias) y en los que se emplearon metodologías para analizar dicha calidad. En la mayoría de los documentos analizados se aprecia un evidente interés por el estudio del efecto del uso del suelo en la calidad del agua y la implementación y búsqueda de metodologías adecuadas para llevar a cabo dicho análisis, sobre todo en países como China, Colombia, Brasil y Estados Unidos.

**Figura 3. Distribución de los artículos por país de estudio (n=59 estudios)**



**Figura 4. Distribución de los artículos seleccionados por continente de estudio (n=59 estudios)**



En una visión más amplia del estudio, se puede evidenciar un mayor interés en el tema en los países de América del Sur, dato fundamental en esta revisión

sistemática, ya que, estos países son ricos en ecosistemas de alta montaña, fundamentales en el ciclo hidrológico y con importancia en los servicios de suministro hídrico<sup>14</sup>. El aumento de la demanda de alimentos por causa del crecimiento de la población está generando la necesidad de utilizar los suelos de alta montaña para las diferentes actividades agrícolas y pecuarias, lo que altera significativamente el comportamiento hidrológico y afecta directamente el suministro del agua<sup>15</sup>.

## **2.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EVALUADOS EN LA CALIDAD DEL AGUA**

La Organización Mundial de la Salud, para la protección de los recursos hídricos recomienda evaluar la influencia del uso del suelo en la calidad del agua superficial, teniendo en cuenta cada una de las actividades que se realizan alrededor de dichas fuentes<sup>16</sup>. A pesar del avance de los estudios, los recursos hídricos siguen enfrentando grandes desafíos de cantidad y calidad debido principalmente al aumento de la población, lo que ha generado gran demanda de alimentos y expansión en la producción agrícola y pecuaria<sup>17 18</sup>. El desarrollo de ciertas actividades agrícolas y pecuarias en zonas consideradas frágiles genera cambios en el uso del suelo y, por ende, efectos sobre la calidad del agua. Dicha calidad puede ser analizada estableciendo zonas de monitoreo en el sitio a estudiar en un periodo determinado de tiempo. De igual forma, se lleva a cabo la toma de muestras

---

<sup>14</sup> R. DE COLOMBIA MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE et al., Op. Cit.

<sup>15</sup> BUYTAERT W. et al. Op. Cit.

<sup>16</sup> VAN DER HOVEN C., UBOMBA-JASWA E., VAN DER MERWE B., LOUBSER M., and ABIA A. L. K., Op. Cit.

<sup>17</sup> BROETTO T., TORNQUIST C. G., DE CAMPOS B.-H. C., and SCHNEIDER J. C., "Relationships between Agriculture, Riparian Vegetation, and Surface Water Quality in Watersheds," Rev. Bras. Ciência do Solo, vol. 41, no. 0, 2017

<sup>18</sup> VAN DER HOVEN C., UBOMBA-JASWA E., VAN DER MERWE B., LOUBSER M., and ABIA A. L. K., Op. Cit.

de manera sistemática, para detectar impactos ambientales y posibles fuentes de contaminación, analizando diversos parámetros físicos, químicos y biológicos de las corrientes de agua, los cuales pueden medirse directamente in situ empleando instrumentos de monitoreo o en laboratorios teniendo en cuenta criterios estándar<sup>19</sup>  
<sup>20</sup> <sup>21</sup>.

Los parámetros fisicoquímicos y biológicos analizados en los diferentes documentos, eran: fósforo soluble, Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), Amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), Bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ), Nitrógeno orgánico total, Nitrógeno disuelto total, Nitrógeno total, Profundidad eutrófica, Coliformes fecales, Coliformes totales, *Escherichia coli*, Clorofila, Fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Fósforo reactivo disuelto, Sedimentos, Sólidos disueltos totales, Sólidos totales, Alcalinidad, Cloro (Cl), Silicio (Si), Hierro (Fe), Arsénico (As), Bario (Ba), Zinc (Zn), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Magnesio (Mn), Sodio (Na), Potasio (K), Cobre (Cu), Manganeseo (Mg), Aluminio (Al), Dureza, Color, Temperatura, Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), DQO,  $\text{DBO}_5$ , Fósforo (P), Nitrógeno (N), pH, Conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto, Sólidos suspendidos totales, Turbidez, Calcio (Ca) y Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

**2.2.1 Contaminantes y su transporte** El transporte de contaminantes está principalmente relacionado con las altas precipitaciones, vegetación, topografía de la zona y tipo de suelo. En las Tablas 1- 4, se evidencian la frecuencia de los suelos, la vegetación, la topografía y la precipitación media anual mencionada en los 59 documentos revisados, teniendo en cuenta solo aquellos que proporcionan esta

---

<sup>19</sup> TANAKA M. O., DE SOUZA A. L. T., MOSCHINI L. E., and DE OLIVEIRA A. K., "Influence of watershed land use and riparian characteristics on biological indicators of stream water quality in southeastern Brazil," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 216, pp. 333–339, Jan. 2016

<sup>20</sup> FLYNN R. M. et al., "Using microbiological tracers to assess the impact of winter land use restrictions on the quality of stream headwaters in a small catchment," *Sci. Total Environ.*, vol. 541, pp. 949–956, Jan. 2016

<sup>21</sup> YU S., XU Z., WU W., and ZUO D., "Effect of land use types on stream water quality under seasonal variation and topographic characteristics in the Wei River basin, China," *Ecol. Indic.*, vol. 60, pp. 202–212, Jan. 2016

información. Los demás documentos fueron descartados por no proporcionar información pertinente.

**Tabla 1. Frecuencia de la precipitación media anual en los estudios que la reportan (n=30)**

| PRECIPITACIÓN | NÚMERO DE DOCUMENTOS |
|---------------|----------------------|
| 100-300 mm    | 2                    |
| 300-600 mm    | 2                    |
| 600-900 mm    | 6                    |
| 900-1200 mm   | 5                    |
| 1200-1500 mm  | 7                    |
| 1500-2000 mm  | 6                    |
| > 2000 mm     | 1                    |

La variación en la precipitación de la zona tiene gran efecto en las concentraciones de contaminantes del agua de la fuente hídrica<sup>22</sup>. Entre mayor sea la cantidad de precipitación, mayor es la probabilidad de deteriorar la calidad del agua mediante el transporte de sedimentos<sup>23</sup> que se da en las cuencas por medio de escorrentía superficial<sup>24</sup>. Las fuentes de contaminación no puntual (NPS) generalmente provienen de fuentes difusas como la agricultura<sup>25</sup>, se transfieren a las corrientes por medio de escorrentía superficial, afectando negativamente la calidad del agua de las fuentes hídricas en los eventos de precipitación<sup>26</sup>.

El manejo de pasturas de ganado origina cambios en la estabilidad estructural de los suelos, afectando la erosión y la escorrentía transportando materia orgánica y

<sup>22</sup> SHI P., ZHANG Y., LI Z., LI P., and XU G., "Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales," CATENA, vol. 151, pp. 182–190, Apr. 2017

<sup>23</sup> MICHAEL A., SCHMIDT J., W ENKE., DEUTSCHLÄNDER T., and MALITZ G., "Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss—results of comparative model simulations," CATENA, vol. 61, no. 2–3, pp. 155–164, Jun. 2005

<sup>24</sup> ESPINOSA J. and RIVERA D., "Variations in water resources availability at the Ecuadorian páramo due to land-use changes," Environ. Earth Sci., vol. 75, no. 16, p. 1173, Aug. 2016

<sup>25</sup> SHI P., ZHANG Y., LI Z., LI P., and XU G., Op. Cit.

<sup>26</sup> JOHNSON J. D., JIN Robert C., CARREIRO Hwa-Seong, JACK Margaret M., "Macroinvertebrate community structure, secondary production and trophic-level dynamics in urban streams affected by non-point-source pollution," Freshw. Biol., vol. 58, no. 5, pp. 843–857, May 2013

otros nutrientes a las fuentes superficiales<sup>27</sup>. La topografía y el tipo de suelo son factores fundamentales por su gama de propiedades y características en la generación de escorrentía, erosión, transporte de solutos y la capacidad de almacenamiento de agua<sup>28</sup>.

Los productos químicos, demás contaminantes y nutrientes generalmente se disuelven en el agua o se adhieren a los suelos y son transportados hacia las cuencas hidrográficas, arroyos, ríos y otras fuentes superficiales contaminándolas por medio de procesos conocidos como advección y difusión<sup>29</sup>.

**Tabla 2. Frecuencia de la vegetación mencionada en los diferentes documentos (n=30)**

| VEGETACIÓN          | NÚMERO DE DOCUMENTOS |
|---------------------|----------------------|
| Bosques nativos     | 23                   |
| Pastizales          | 17                   |
| Bosques secundarios | 4                    |
| Otros               | 4                    |

La cobertura del suelo es importante en la evaluación de los flujos de nutrientes y la recarga de aguas subterráneas<sup>30</sup>, el desarrollo de diferentes actividades genera diferentes cambios en su uso y altera el sistema hidrológico, propiciando fenómenos como la escorrentía pluvial, considerada fuente de contaminación no puntal, la cual tiene un aumento relativamente mayor en los meses de lluvia<sup>31</sup>

<sup>27</sup> BUYTAERT W. et al., Op. Cit.

<sup>28</sup> KÄNDLER M. et al., "Impact of land use on water quality in the upper Nisa catchment in the Czech Republic and in Germany," Sci. Total Environ., vol. 586, pp. 1316–1325, May 2017

<sup>29</sup> HE Z., WENG H., HO H.-C., RAN Q., and MAO M., Op. Cit.

<sup>30</sup> KÄNDLER M. et al., Op. Cit.

<sup>31</sup> HE Z., WENG H., HO H.-C., RAN Q., and MAO M., Op. Cit.

**Tabla 3. Frecuencia de los tipos de suelo mencionados en los diferentes documentos (n=26)**

| SUELOS             | NÚMERO DE DOCUMENTOS |
|--------------------|----------------------|
| Arenosos           | 8                    |
| Arcillas           | 7                    |
| volcanicos         | 6                    |
| Inceptisoles       | 4                    |
| Entisoles          | 3                    |
| Andosoles          | 3                    |
| Marrón amarillento | 2                    |
| Oxisoles           | 2                    |
| Poco permeable     | 2                    |
| Granodioritas      | 2                    |
| Areniscas          | 2                    |
| Litosoles          | 2                    |
| Luvsoles           | 2                    |
| Latosoles          | 2                    |
| Gleysoles          | 2                    |
| Regosoles          | 2                    |
| Histosoles         | 2                    |
| Marrones           | 2                    |
| Erosionados        | 1                    |
| Ultisoles          | 1                    |
| Granitos           | 1                    |
| Fluvisoles         | 1                    |
| Andisoles          | 1                    |
| Umbrisoles         | 1                    |
| Barro              | 1                    |
| Cambisoles         | 1                    |
| Vertisoles         | 1                    |
| Bien drenados      | 1                    |

Por otro lado, la erosión se ve intensificada por el empleo de productos agroquímicos, por ejemplo, la mayoría de los suelos agrícolas son luvisoles con alto contenido de limo y baja tasa de infiltración, siendo fácilmente erosionables y además contribuyen a la carga suspendida de los ríos<sup>32 33</sup>. Sumado a esto, en los resultados presentados en la investigación realizada en la cuenca del río las Piedras, localizado en la alta montaña colombiana, se expresa que los principales contaminantes de la calidad del agua son las altas concentraciones de fósforo y nitrógeno y como consecuencia se ve reflejada la producción y crecimiento de algas en las corrientes, por las posibles alteraciones físicas, químicas y biológicas del

<sup>32</sup> KÄNDLER M. et al., Op. Cit.

<sup>33</sup> HE Z., WENG H., HO H.-C., RAN Q., and MAO M., Op. Cit.

agua, fenómeno conocido como eutrofización<sup>34 35 36</sup>. Por último, el arrastre de sedimentos es otro factor y fuente de contaminación; ya que estos pueden depositarse en los recursos hídricos afectando su calidad<sup>37</sup>.

**Tabla 4. Frecuencia de la topografía mencionada en los diferentes documentos (n=30)**

| TOPOGRAFÍA       | NÚMERO DE DOCUMENTOS |
|------------------|----------------------|
| Cadena montañosa | 31                   |
| Colinas          | 3                    |
| Meseta           | 1                    |

La topografía presentada en los estudios facilita los aportes de escorrentía a las cuerpos de agua, las pendientes del terreno contribuyen con el transporte de diferentes concentraciones de nutrientes y solutos, el arrastre de fosfatos y nitratos, concentraciones que alteran la calidad de las fuentes superficiales<sup>38 39</sup>. Se han diseñado experimentos para caracterizar el transporte de contaminantes, comprender los mecanismos de transferencia de la erosión del suelo y los procesos de escorrentía. Dichos experimentos se realizaron bajo diferentes pendientes (15° y 20°), midiendo las concentraciones de los contaminantes, el rendimiento de los sedimentos y los volúmenes de escorrentía<sup>40</sup>, llegando a la conclusión que la erosión es proporcional a las pendientes del suelo, e igualmente una pendiente más pronunciada induce la mayor velocidad del flujo y la tasa de erosión<sup>41</sup>.

<sup>34</sup> RUIZ D. M., MARTÍNEZ IDROBO J. P., OTERO SARMIENTO J. D., and FIGUEROA CASAS A., "Effects of productive activities on the water quality for human consumption in an andean basin, a case study," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 33, no. 3, pp. 361–375, Aug. 2017

<sup>35</sup> HE Z., WENG H., HO H.-C., RAN Q., and MAO M., *Op. Cit.*

<sup>36</sup> OTERO J. D., FIGUEROA A., MUÑOZ F. A., and PEÑA M. R., *Op. Cit.*

<sup>37</sup> HE Z., WENG H., HO H.-C., RAN Q., and MAO M., *Op. Cit.*

<sup>38</sup> KÄNDLER M. et al., *Op. Cit.*

<sup>39</sup> ESPINOSA J. and RIVERA D., *Op. Cit.*

<sup>40</sup> HE Z., WENG H., HO H.-C., RAN Q., and MAO M., *Op. Cit.*

<sup>41</sup> *Ibid.*

**2.2.2 Actividades agrícolas y pecuarias** Los asentamientos humanos y la intensificación de actividades agrícolas y pecuarias alrededor de fuentes superficiales afectan significativamente la calidad del agua, generando la contaminación en las corrientes y aumentando la producción de desechos y residuos. La proximidad del uso de la tierra a las orillas de las corrientes tienen fuertes impactos negativos sobre la calidad del agua<sup>42</sup>.

La agricultura es la fuente principal de contaminación y degradación de los recursos hídricos, ya que, las técnicas de plantación, el uso de insumos químicos, el suministro de agua y riego de cultivo modifican las características fisicoquímicas y biológica de los ríos<sup>43</sup>.

En la Tabla 5 se evidencia la frecuencia de los diferentes cultivos que se mencionaban en los 59 documentos revisados, pero solo teniendo en cuenta aquellos que proporcionaban esta información.

**Tabla 5. Frecuencia de los cultivos mencionados en los diferentes documentos (n=14)**

| CULTIVOS       | NÚMERO DE DOCUMENTOS |
|----------------|----------------------|
| Maíz           | 4                    |
| Arroz          | 4                    |
| Trigo          | 3                    |
| Caña de azúcar | 3                    |
| Papa           | 3                    |
| Café           | 2                    |
| Soja           | 2                    |
| Granos         | 2                    |
| Frutas         | 2                    |
| Vegetales      | 2                    |
| Maní           | 1                    |
| Naranja        | 1                    |
| Avena negra    | 1                    |
| Caucho         | 1                    |
| Platano        | 1                    |
| Cacao          | 1                    |
| Piña           | 1                    |
| Frijoles       | 1                    |
| Cereales       | 1                    |
| Hortalizas     | 1                    |
| Batata         | 1                    |

<sup>42</sup> SHI P., ZHANG Y., LI Z., LI P., and XU G., Op. Cit.

<sup>43</sup> UIZ D. M., MARTÍNEZ IDROBO J. P., OTERO SARMIENTO J. D., and FIGUEROA CASAS A., Op. Cit.

Muchos autores coinciden en que los diferentes cultivos mencionados en la Tabla 5 presentan afectación negativa sobre la calidad del agua, por ejemplo, en el estudio realizado en la cuenca del Río Pike (Canadá), al expandir las áreas de cultivos de maíz en la zona se necesitarán más nutrientes y abono para su desarrollo, lo que conlleva a que se transporten mayores cargas de sedimentos, nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y fósforo (P) a las fuentes superficiales por medio de la escorrentía superficial<sup>44</sup>.

Por otro lado, en las zonas frágiles en muchas ocasiones se presenta deterioro o no se encuentran barreras protectoras, como cercas u otros mecanismos que impida el acceso libre del ganado y otros animales a las fuentes superficiales, generando su contaminación, con aportes bacterianos de excreciones<sup>45</sup>, aumentados patrones de sedimentación y reflejando concentraciones de coliformes fecales y totales<sup>46</sup>. En la Tabla 6 se evidencia la frecuencia de los diferentes ganados que se mencionaban en los 59 documentos revisados, pero solo teniendo en cuenta aquellos que proporcionaban esta información.

**Tabla 6. Frecuencia de ganado mencionado en los diferentes artículos (n=12)**

| GANADERÍA     | NÚMERO DE DOCUMENTOS |
|---------------|----------------------|
| Ganado Bovino | 10                   |
| Porcino       | 4                    |
| Ovejas        | 2                    |
| Buey          | 1                    |
| Ciervos       | 1                    |
| Lobos         | 1                    |
| Halcones      | 1                    |

Las zonas caracterizadas por la producción porcina traen consigo la generación de estiércol de cerdo, que contiene concentraciones significativas de fósforo empleado

<sup>44</sup> MEHDI B. et al., "Simulated impacts of climate change and agricultural land use change on surface water quality with and without adaptation management strategies," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 213, pp. 47–60, Dec. 2015

<sup>45</sup> BROETTO T., TORNQUIST C. G., DE CAMPOS B.-H. C., and SCHNEIDER J. C., Op. Cit.

<sup>46</sup> OTERO J. D., FIGUEROA A., MUÑOZ F. A., and PEÑA M. R., Op. Cit.

frecuentemente como fertilizante en las tierras cultivables y puede acumularse en los suelos por lixiviación llegando hasta las corrientes afectando su calidad<sup>47 48</sup> [12],[23]. Por otra parte, las cuencas que presentan altas concentraciones de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en las corrientes de agua, probablemente son producto de concentraciones de fertilizantes de estiércol<sup>49</sup>.

**2.2.2.1 Frecuencias de parámetros fisicoquímicos relacionados con actividades agrícolas y pecuarias** En la Tabla 7 se presenta la frecuencia de estudio de cada parámetro para evaluar la calidad de las fuentes superficiales por influencia agrícola y pecuaria. En los monitoreos encontrados en cada uno de los artículos, algunos mostraban resultados de diferentes temporadas (húmedo y seco), el lugar de estudio (aguas arriba y aguas abajo) e información de valores máximos y mínimos, mientras que en otros no especificaban la temporada de estudio, los cuales se asumieron como estándar y se discretizaron según el lugar de monitoreo (aguas arriba y aguas abajo) (Ver Anexo 4).

---

<sup>47</sup> BROETTO T., TORNQUIST C. G., DE CAMPOS B.-H. C., and SCHNEIDER J. C.,

<sup>48</sup> HART M. R., QUIN B. F., and NGUYEN M. L., "Phosphorus Runoff from Agricultural Land and Direct Fertilizer Effects," J. Environ. Qual., vol. 33, no. 6, p. 1954, Nov. 2004

<sup>49</sup> PENG T.-R., LIN H.-J., WANG C.-H., LIU T.-S., and KAO S.-J., "Pollution and variation of stream nitrate in a protected high-mountain watershed of Central Taiwan: evidence from nitrate concentration and nitrogen and oxygen isotope compositions," Environ. Monit. Assess., vol. 184, no. 8, pp. 4985–4998, Aug. 2012

**Tabla 7. Frecuencia de parámetros estudiados en las fuentes superficiales por actividades agrícolas y pecuarias**

| PARÁMETROS                                             | NÚMERO DE DOCUMENTOS |
|--------------------------------------------------------|----------------------|
| pH                                                     | 13                   |
| Conductividad eléctrica [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]    | 13                   |
| Nitratos [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                      | 11                   |
| Oxígeno disuelto [ $\text{mg}/\text{L}$ ]              | 11                   |
| Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]                     | 8                    |
| Fósforo total [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                 | 8                    |
| Nitritos [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                      | 7                    |
| Amonio [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                        | 6                    |
| Demanda química de Oxígeno [ $\text{mg}/\text{L}$ ]    | 6                    |
| Turbidez [NTU]                                         | 6                    |
| Nitrógeno total [ $\text{mg}/\text{L}$ ]               | 6                    |
| Magnesio [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                      | 5                    |
| Calcio [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                        | 5                    |
| Sólidos disueltos totales [ $\text{mg}/\text{L}$ ]     | 5                    |
| Demanda bioquímica de Oxígeno [ $\text{mg}/\text{L}$ ] | 4                    |
| Sulfato [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                       | 4                    |
| Cloro [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                         | 4                    |
| Hierro [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                        | 4                    |
| Potasio [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                       | 4                    |
| Amoniaco [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                      | 3                    |
| Fosfato [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                       | 3                    |
| Sólidos totales [ $\text{mg}/\text{L}$ ]               | 3                    |
| Color [UH]                                             | 2                    |
| Coliformes totales [CFU/100 ml]                        | 2                    |
| Coliformes fecales [CFU/100 ml]                        | 2                    |
| <i>Escherichia coli</i> [NMP / 100 ml]                 | 2                    |
| Dureza [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                        | 2                    |
| Fósforo reactivo disuelto [ $\mu\text{g}/\text{L}$ ]   | 2                    |
| Alcalinidad [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                   | 2                    |
| Silicio [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                       | 2                    |
| Arsénico [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                      | 2                    |
| Bario [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                         | 2                    |
| Zinc [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                          | 2                    |
| Níquel [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                        | 2                    |
| Plomo [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                         | 2                    |
| Manganeso [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                     | 2                    |
| Cobre [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                         | 2                    |
| Nitrógeno Orgánico total [ $\text{mg}/\text{L}$ ]      | 1                    |
| Profundidad eutrófica [m]                              | 1                    |
| Clorofila [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                     | 1                    |
| Aluminio [ $\text{mg}/\text{L}$ ]                      | 1                    |

A partir de lo anterior, se pueden distinguir los parámetros más comunes analizados en los diferentes estudios. Por tal razón, en el Anexo 5 se representa de manera esquemática la información presentada en la Tabla 7 y se evidencia que los parámetros fisicoquímicos y biológicos frecuentemente estudiados para evaluar la calidad del agua de las fuentes superficiales son: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), temperatura y fósforo total. Sin embargo, también es importante indicar que son pocos los autores que especifican en su estudio parámetros como: Aluminio, clorofila, profundidad eutrófica y Nitrógeno Orgánico total.

**2.2.2.2 Valores de referencia de parámetros fisicoquímicos** En el Anexo 6 se presentan los valores máximos y mínimos de los parámetros fisicoquímicos recopilados en diferentes investigaciones, en periodo húmedo, seco y estándar (no se tiene en cuenta periodo estacional) y en estaciones de monitoreo localizadas aguas arriba y aguas debajo de las corrientes. A continuación, se presenta información detallada de los parámetros frecuentemente estudiados en las investigaciones.

- **Nitratos**

Las concentraciones de nitratos en las corrientes principalmente se deben al uso de fertilizantes utilizados para el desarrollo de la agricultura alrededor de las cuencas<sup>50</sup>. Las altas concentraciones de ( $\text{NO}_3^-$ ) frecuentemente están relacionadas con el acceso libre del ganado a los cursos de agua, contaminando de este modo las fuentes superficiales con concentraciones de residuos fecales<sup>51</sup> e induciendo a la eutrofización ambiental<sup>52</sup>.

Los valores máximos de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) presentados, se encuentran entre de 125 [mg/L] y 60 [mg/L] aguas arriba aproximadamente, mientras que los valores mínimos presentan rangos entre 0.015 [mg/L] y 0.886 [mg/L] (Anexo 6). Varios autores consideran que las concentraciones aumentan a medida que el agua de la corriente fluye aguas abajo, pero esta tendencia no siempre se presenta debido a que pueden existir zonas comprendidas entre los tramos de monitoreo establecidos entre las estaciones seleccionadas como aguas arriba y aguas abajo que presenten suelos poco cultivados o presenten vegetación ribereña que actúa como un amortiguador causando efectos de disolución de los contaminantes<sup>53 54</sup>, lo que conlleva a que

---

<sup>50</sup> Ibíd.

<sup>51</sup> BROETTO T., TORNQUIST C. G., DE CAMPOS B.-H. C., and SCHNEIDER J. C., Op. Cit.

<sup>52</sup> PENG T.-R., LIN H.-J., WANG C.-H., LIU T.-S., and KAO S.-J., Op. Cit.

<sup>53</sup> MEHDI B. et al., Op. Cit.

<sup>54</sup> PENG T.-R., LIN H.-J., WANG C.-H., LIU T.-S., and KAO S.-J., Op. Cit.

el ingreso de nutrientes a las corrientes sea en menor proporción, por tanto, en esta ocasión se presentan valores mayores de nitratos en la zona de monitoreo aguas arriba (Anexo 6). La zona de monitoreo que contribuye con el máximo valor de nitratos es una de las principales fuentes de contaminación de la cuenca estudiada debido al uso de fertilizantes empleados para el desarrollo de actividades agrícolas<sup>55</sup>.

Según las evaluaciones de la calidad del agua publicadas en nombre de la Organización Mundial de la Salud y del Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente los valores de nitratos que se encuentran dentro de los rangos naturales de los ríos están entre 0.22 [mg/L] y 0.88 [mg/L]<sup>56</sup> .

De acuerdo con los datos obtenidos en diversas investigaciones se puede observar que las concentraciones de ( $\text{NO}_3^-$ ) son más altas en la estación húmeda que en la seca (ver Anexo 6), pero en la estación seca las concentraciones de nitratos pueden aumentar debido a que los cuerpos de agua reducen su capacidad de disolución, afectando su calidad<sup>57</sup>.

- **Oxígeno disuelto**

Un factor importante de los cuerpos de agua localizados en las zonas altoandinas es la altitud, que ocasiona una disminución de oxígeno en la atmosfera y por consiguiente la concentración de oxígeno en el agua disminuye, este parámetro es de vital importancia para la existencia de diferentes organismos en los ecosistemas

---

<sup>55</sup> Ibíd.

<sup>56</sup> CHAPMAN Deborah, Ed., Water Quality Assessments-A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring-Second Edition, Second edi. E&FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 1992

<sup>57</sup> RUIZ D. M., MARTÍNEZ IDROBO J. P., OTERO SARMIENTO J. D., and FIGUEROA CASAS A., Op. Cit.

acuáticos<sup>58</sup>. La producción de fósforo y nitrógeno proviene principalmente de fuentes agrícolas y ganaderas, donde el pastoreo de animales contribuye a la erosión de los campos agrícolas<sup>59 60</sup>, factor que condiciona el transporte de estos componentes a los cursos de agua, el exceso de dichos parámetros genera la proliferación de algas y otra vegetación, que al presentarse en altas concentraciones producen el agotamiento de oxígeno<sup>61</sup>, a medida que las células mueren y se asientan en el fondo de las corrientes, donde son descompuestas por las bacterias. El proceso de descomposición consume oxígeno del agua a través de la respiración bacteriana, afectando de este modo la calidad de las fuentes superficiales<sup>62</sup>.

Según las investigaciones analizadas donde se presenta una fuerte influencia antropogénica, los valores más altos de oxígeno percibidos en el agua se registraron en monitoreos realizados en horas de la mañana y los valores más bajos durante la noche en la estación seca, causados por el proceso de fotosíntesis de las plantas<sup>63</sup> [26].

El valor máximo monitoreado en las investigaciones fue de 9.5 [mg/L] aguas arriba y el mínimo de 4.5 [mg/L] aguas abajo (Anexo 6), El valor máximo monitoreado en las investigaciones fue de 9.5 [mg/L] aguas arriba y el mínimo de 4.5 [mg/L] aguas abajo (Anexo 6), de acuerdo con los estándares de calidad del agua del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales del gobierno de

---

<sup>58</sup> BURNEO P. C. and GUNKEL G., "Ecology of a high Andean stream, Rio Itambi, Otavalo, Ecuador," *Limnol. - Ecol. Manag. Int. Waters*, vol. 33, no. 1, pp. 29–43, Apr. 2003

<sup>59</sup> MITTELSTET A. R., STORM D. E., and WHITE M. J., "Using SWAT to enhance watershed-based plans to meet numeric water quality standards," *Sustain. Water Qual. Ecol.*, vol. 7, pp. 5–21, May 2016

<sup>60</sup> JOHNES P. J. and HEATHWAITE A. L., "Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments," *Hydrol. Process.*, vol. 11, no. 3, pp. 269–286, Mar. 1997

<sup>61</sup> MITTELSTET A. R., STORM D. E., and WHITE M. J., *Op. Cit.*

<sup>62</sup> CARR G. M., NEARY J. P., GEMS/Water (Programme), and United Nations Environment Programme., *Water quality for ecosystem and human health*. UN GEMS/Water Programme Office, 2008

<sup>63</sup> BURNEO P. C. and GUNKEL G., *Op. Cit.*

Colombia) un valor de oxígeno disuelto superior a 4 mg/L afecta la calidad de la fuente superficial y por tanto la diversidad biológica de esta<sup>64</sup>.

- **Turbidez**

Las concentraciones de sólidos suspendidos en las fuentes superficiales a menudo son el resultado de sedimentos y sólidos transportados por la escorrentía superficial, la fuente de estos sedimentos incluye actividades naturales y antropogénicas desarrolladas alrededor de las cuencas, generando la erosión natural o excesiva del suelo producida por la ejecución de prácticas agrícolas<sup>65</sup>. Las concentraciones de este parámetro varían con respecto a la altitud de la cuenca de estudio, en la parte superior de la corriente generalmente se presentan valores bajos y aumentan ligeramente al en la parte inferior, esto está relacionado con la localización de los cultivos y la reducción de la vegetación riparia que favorece la erosión de los suelos<sup>66</sup>.

El valor máximo recopilado en las investigaciones fue de 147.47 UNT y el mínimo de 5.6 UNT. El agua con altas concentraciones de turbidez no es adecuada para el consumo, varios autores establecen que los recuentos medios de *E. coli* tienen una correlación positiva con este parámetro fisicoquímico, ya que la turbidez está relacionada con las altas concentraciones de microorganismo y desechos orgánicos en las corrientes, producidos por actividades agrícolas y pecuarias<sup>67</sup>.

---

<sup>64</sup> "Sistema de Información del Medio Ambiente Identificación de la Variable Descripción General," 2003

<sup>65</sup> CARR G. M., NEARY J. P., Op. Cit.

<sup>66</sup> RUIZ D. M., MARTÍNEZ IDROBO J. P., OTERO SARMIENTO J. D., and FIGUEROA CASAS A., Op. Cit.

<sup>67</sup> VAN DER HOVEN C., UBOMBA-JASWA E., VAN DER MERWE B., LOUBSER M., and ABIA A. L. K., Op. Cit.

Según las evaluaciones de la calidad del agua publicadas en nombre de la Organización Mundial de la Salud y del Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente el valor de Turbidez necesario para una buena calidad del agua es de 10 UNT<sup>68</sup> .

- **pH**

En las investigaciones donde se desarrollaban actividades agrícolas alrededor de las fuentes superficiales se puede observar que en tiempo seco los valores máximos de pH variaron entre 8.1 y 8.4 mientras que el valor mínimo recopilado en los estudios realizados durante el tiempo húmedo fue de 6 (Ver Anexo 6).

Las altas concentraciones de partículas suspendidas y materia orgánica en las fuentes superficiales causan valores bajos de pH en el agua, frecuentemente en las temporadas de alta precipitación. Dichas concentraciones ingresan a las corrientes generalmente por procesos de escorrentía y se incrementan cuando los suelos se encuentran sin protección (capa vegetal), generados por procesos de deforestación y el desarrollo de actividades agrícolas. Igualmente, el uso de agroquímicos en los cultivos intensifica los procesos erosivos y la contaminación de las fuentes, alterando el pH. Un valor de pH promedio esta alrededor de los 7.2 considerando de este modo una corriente en estado neutro<sup>69</sup>.

Según las evaluaciones de la calidad del agua publicadas en nombre de la Organización Mundial de la Salud y del Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente los valores de pH que se encuentran dentro de los rangos naturales de los ríos están entre 6.2 y 8.2<sup>70</sup>.

---

<sup>68</sup> CHAPMAN Deborah, Op. Cit.

<sup>69</sup> RUIZ D. M., MARTÍNEZ IDROBO J. P., OTERO SARMIENTO J. D., and FIGUEROA CASAS A., Op. Cit.

<sup>70</sup> CHAPMAN Deborah, Op. Cit.

- **DBO<sub>5</sub>**

La demanda bioquímica de oxígeno es un parámetro importante ya que define la cantidad de oxígeno requerido por las bacterias en el proceso de estabilización de la materia orgánica bajo condiciones aeróbicas<sup>71</sup>.

Los valores máximos de DBO<sub>5</sub> corresponden a las muestras recolectadas en cuencas donde a su alrededor se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas, que en su ejecución pueden producir desechos orgánicos aumentando el DBO<sub>5</sub> de las fuentes superficiales, se observan rangos entre 14 y 25 (mg/L) (Anexo 6) recopiladas en el periodo seco, por tal motivo se establece que la corriente estudiada se encuentra en mal estado, ya que de acuerdo a los estándares de calidad del agua del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales del gobierno colombiano) un valor de DBO superior a 2 mg/L se considera corriente contaminada<sup>72</sup>. Por otra parte, en la investigación realizada en el Río Itambí (Norte de Ecuador) la calidad del agua disminuye durante las temporadas secas, por la disminución de las corrientes, provocando aumento de temperatura y DBO<sup>73</sup>.

Según Roldán comúnmente las corrientes que tienen afluentes localizados en áreas altas de las cadenas montañosas contienen grandes concentraciones de sedimentos provocados por los procesos de erosión, movimientos de masa y otros fenómenos similares que ocurren de manera esporádica en este tipo de zonas<sup>74</sup>.

---

<sup>71</sup> VERA PUERTO I. Leonardo, "Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo qual2k como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D. C.," 2007

<sup>72</sup> NAVARRO R. Maria Olga, "Demanda Bioquímica de Oxígeno.," 2007

<sup>73</sup> BURNEO P. C. and GUNKEL G., Op. Cit.

<sup>74</sup> ROLDÁN PÉREZ G., Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. 1996.

- **Fósforo**

La contaminación del agua por las concentraciones de fósforo se debe a la contribución de diversas fuentes como el ganado, los pastizales, las ovejas, las actividades agrícolas, siendo esta última la principal fuente contribuyente de este parámetro<sup>75 76</sup>, igualmente el estiércol de cerdo contiene grandes cantidades de fósforo<sup>77</sup>. El fósforo acumulado en los suelos o aplicado a los fertilizantes empleados en el desarrollo de cultivos puede perderse en el suelo por medio de procesos como la lixiviación o la escorrentía superficial, transfiriéndolo de este modo a los cuerpos de agua<sup>78</sup>. Según Johnes et al. este parámetro es más sensible a variaciones en cultivos de cereales<sup>79</sup>. En las investigaciones estudiadas el máximo valor de fósforo presentado (Anexo 6) fue de 8.69 [mg/L] y el mínimo corresponde a un valor de 0.23 [mg/L]. Según los estándares de calidad del agua solo son necesarias pequeñas concentraciones de este elemento para que un cuerpo de agua presente un estado eutrófico<sup>80</sup>. Según el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales del gobierno colombiano) un valor de fósforo superior a 0.05 mg/L afecta la fuente de agua superficial<sup>81</sup>.

## **2.3 METODOLOGÍAS EMPLEADAS**

**2.3.1 Mediciones sobre las fuentes superficiales** De manera general, en las investigaciones realizadas se recopilaron muestras en las corrientes y en algunos casos en sus afluentes principales y tributarios con el fin de examinar y establecer

---

<sup>75</sup> JOHNES P. J. and HEATHWAITE A. L., Op. Cit.

<sup>76</sup> HART M. R., QUIN B. F., and NGUYEN M. L., Op. Cit.

<sup>77</sup> BROETTO T., TORNQUIST C. G., DE CAMPOS B.-H. C., and SCHNEIDER J. C., Op. Cit.

<sup>78</sup> HART M. R., QUIN B. F., and NGUYEN M. L., Op. Cit.

<sup>79</sup> JOHNES P. J. and HEATHWAITE A. L., Op. Cit.

<sup>80</sup> HART M. R., QUIN B. F., and NGUYEN M. L., Op. Cit.

<sup>81</sup> SANABRIA SUAREZ D., "Fósforo total en agua por digestión ácida, método del ácido ascórbico," Ideam-Meteo, vol. 2, pp. 1–14, 2004

las variaciones de la calidad del agua debido al uso del suelo. Los estudios se dividían en varias campañas realizadas en diferentes periodos de tiempo, diario, mensual, semanal, o anualmente, recopilando una o varias muestras en cada punto de monitoreo.

Ocasionalmente se variaba la profundidad de recolección de muestras tomando precauciones para no alterar posibles contenidos de sedimentos en el fondo de las corrientes y empleando botellas estériles con valores de volúmenes de 1 litro<sup>82</sup>, en otros casos las muestras se recolectaban manualmente en recipientes de vidrio y color ámbar o en recipientes de material plástico y limpio<sup>83 84 85</sup>.

En la Tabla 8 se presentan los parámetros anteriormente mencionados (puntos y tiempo de monitoreo, muestras recolectadas, campañas de muestreo, entre otras) estableciendo diferentes rangos y la frecuencia de ejecución en las investigaciones analizadas. Para la realización de la tabla se tuvo en cuenta solo 21 estudios que contenían información relevante.

**Tabla 8. Frecuencias de las mediciones realizadas en los documentos (n=21 estudios)**

| Puntos de monitoreo (n=19) |            |
|----------------------------|------------|
| Intervalo                  | Frecuencia |
| 3-5                        | 5          |
| 6-10                       | 5          |
| 11-20                      | 3          |
| 21-30                      | 2          |
| 31-60                      | 2          |
| 61-80                      | 1          |
| 81-100                     | 1          |

Nota. 19 de los 21 estudios contienen información relevante.

<sup>82</sup> VAN DER HOVEN C., UBOMBA-JASWA E., VAN DER MERWE B., LOUBSER M., and ABIA A. L. K., Op. Cit.

<sup>83</sup> RUIZ D. M., MARTÍNEZ IDROBO J. P., OTERO SARMIENTO J. D., and FIGUEROA CASAS A., Op. Cit.

<sup>84</sup> VAN DER HOVEN C., UBOMBA-JASWA E., VAN DER MERWE B., LOUBSER M., and ABIA A. L. K., Op. Cit.

<sup>85</sup> DE SOUZA M. M. and GASTALDINI M. do C. C., Op. Cit.

| <b>Muestras recolectadas por ubicación<br/>(n=7)</b> |                   |
|------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Intervalo</b>                                     | <b>Frecuencia</b> |
| 2-3                                                  | 5                 |
| 4-5                                                  | 1                 |
| 5-10                                                 | 1                 |
| <b>Profundidad de recolección (n=5)</b>              |                   |
| <b>Intervalo [m]</b>                                 | <b>Frecuencia</b> |
| 0,1-0,3                                              | 2                 |
| 0,4-0,5                                              | 1                 |
| Mitad de la columna<br>de agua                       | 2                 |
| <b>Tiempo de estudio (n=17)</b>                      |                   |
| <b>Intervalo (meses)</b>                             | <b>Frecuencia</b> |
| 2-10                                                 | 8                 |
| 11-20                                                | 4                 |
| 21-30                                                | 2                 |
| 31-40                                                | 1                 |
| 41-60                                                | 2                 |
| <b>Campañas de muestreo (n=5)</b>                    |                   |
| <b>Intervalo</b>                                     | <b>Frecuencia</b> |
| 1-2                                                  | 3                 |
| 3-4                                                  | 2                 |
| <b>Muestreo realizado (n=10)</b>                     |                   |
| <b>Tipo de muestreo</b>                              | <b>Frecuencia</b> |
| Puntual                                              | 1                 |
| Siguiendo la masa<br>de agua                         | 3                 |
| Puntual y siguiendo<br>la masa de agua               | 6                 |

Nota. 7 de los 21 estudios contiene información de las muestras recolectadas por ubicación, así como 17 del tiempo de estudio, 5 de campañas de muestreo y 10 de muestreos realizados.

De la tabla 8 se puede observar que los puntos de monitoreos frecuentemente utilizados en diferentes investigaciones variaban de 3 a 10 y era poco común encontrar investigaciones con una variación de 61 a 100 puntos de monitoreo. Así mismo, era frecuente encontrar de 2 a 3 muestras recolectadas por ubicación. También, el tiempo de estudio más frecuentado variaba de 2 a 10 meses y generalmente se realizaban de 1 a 2 campañas de monitoreo. En algunas investigaciones variaban la profundidad de recolección de las muestras, siendo más

frecuentes de 0.1 [m] a 0.3 [m] y en la mitad de la columna de agua. Finalmente, el muestreo más utilizado por los autores en los diferentes documentos fue puntual y siguiendo la masa de agua. Cabe resaltar que, debido a la poca información proporcionada por los autores en sus investigaciones, no es posible evidenciar la causa por la que frecuentaban más las anteriores mediciones sobre las fuentes superficiales.

**2.3.2 Modelos empleados** El modelado de la calidad del agua se considera una herramienta de gran importancia para establecer el comportamiento de los ecosistemas estratégicos, aun teniendo pocos datos para su implementación<sup>86 87</sup>. Dichos modelos permiten la simulación principalmente a escala de cuenca<sup>88</sup>, y generalmente deben someterse a procesos de calibración donde se ajustan varios parámetros, estableciendo una óptima relación entre la salida del modelo y las mediciones de campo<sup>89</sup>. Este tema es de gran impacto y ha sido estudiado por diferentes autores adquiriendo información importante sobre la gestión óptima de este recurso<sup>90</sup>.

Los modelos implementados en el estudio de la calidad del agua se pueden clasificar según ciertas características que certifican su aplicabilidad, como: el tipo de proceso ya sea físico, químico o biológico, el método de solución que pueden ser métodos empíricos, soluciones aproximadas, análisis simplificado o modelos

---

<sup>86</sup> BUYTAERT W. et al., Op. Cit.

<sup>87</sup> ALMEIDA S., BULYGINA N., MCINTYRE N., WAGENER T., and BUYTAERT W., "Improving parameter priors for data-scarce estimation problems," *Water Resour. Res.*, vol. 49, pp. 6090–6095, 2013

<sup>88</sup> BAKIR OGUTVEREN Ü., ALBEK, LKER M. BAKIR O., and ALBEK E., "Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. J Hydrol Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF

<sup>89</sup> PELLETIER G. J., CHAPRA S. C., and TAO H., "QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration," *Environ. Model. Softw.*, vol. 21, no. 3, pp. 419–425, Mar. 2006

<sup>90</sup> FAN C., KO C.-H., and WANG W.-S., "An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation," *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 5, pp. 1824–1832, Apr. 2009

matemáticos con diferencias finitas. También el tipo de cuerpo de agua ya sea río, lago o reservorio, la dimensión (1, 2 o 3 dimensiones), el estado que puede ser estacionario, dinámico o cuasi – dinámico, el tipo de cuenca (urbanas o no urbanas) y el tipo de transporte como advección, dispersión o intercambio béntico<sup>91</sup>.

Además de las características que aseguran la aplicabilidad de los modelos, existen otras que de manera general debe estar en capacidad de satisfacer (Anexo 7). Todo modelo seleccionado debe ser capaz de simular parámetros básicos de calidad del agua, debe tener flexibilidad para adaptarse a las condiciones de diferentes corrientes y con esto, no utilizar un modelo diferente en cada situación presentada. También debe tener aplicabilidad, es decir, que sea empleado en regiones similares a la de aplicación del modelo, ser simple en su ejecución y preciso en sus resultados. Igualmente, deben tener viabilidad económica pues no se justifica una gran inversión en un programa que genere casi los mismos resultados de un programa más económico<sup>92 93</sup>

Existen varios modelos aplicados a distintos tipos de cuerpos de agua, ríos, embalses, lagos, e incluyen simulaciones de parámetros básicos de calidad del agua como el oxígeno disuelto, DQO, entre otros, pero también existen modelos que permiten la simulación fenómenos como la eutrofización y efectos de toxicidad<sup>94</sup>. Los modelos complejos no son considerados los más útiles debido a la cantidad de datos de monitoreo necesarios para llevar a cabo su calibración y validación, e incluso pueden requerir parámetros que no han sido medidos en la zona a estudiar. Por tanto, los modelos considerados básicos son una opción

---

<sup>91</sup> LOZANO L. E., ZAPATA G., , PEÑA M. A. y, “Selección del modelo de simulación de calidad de agua en el proyecto “modelación de corrientes hídricas superficiales en el departamento del quindío”,” Grup. Investig. Desarro. y Estud. del Recur. Hídrico y el Ambient. - CIDERA, p. 8, 2003

<sup>92</sup> CASTRO HUERTAS M. Andrea, Op. Cit.

<sup>93</sup> LOZANO L. E., ZAPATA G., , PEÑA M. A. y, Op. Cit.

<sup>94</sup> FAN C., KO C.-H., and WANG W.-S., Op. Cit.

conveniente a la hora de simular ciertos procesos, con los cuales se han reportado varios procesos exitosos, pero a menudo presentan ciertas limitaciones<sup>95</sup>. En la Tabla 9 se presenta un resumen con información sobre los modelos empleados para el análisis de la calidad del agua en las diferentes investigaciones estudiadas.

El proceso general de simulación de una corriente hídrica superficial (Anexo 8), inicia con las especificaciones del problema, es decir, la identificación de las necesidades de la corriente a estudiar. Seguido a esto, se empieza con la etapa de selección del modelo, en donde se puede elegir uno de los modelos existentes o desarrollar un modelo nuevo. Luego se inician las etapas de aplicación, calibración y validación del modelo que permitirán predecir la calidad del agua de las fuentes hídricas<sup>96</sup>. En las primeras etapas es importante la formulación matemática desarrollada para la solución del modelo y también, la obtención de la información para su desarrollo y ejecución. En las etapas intermedias, es importante el análisis de la información obtenida como resultado utilizando métodos estadísticos<sup>97</sup>.

- **SWAT**

SWAT es una herramienta de evaluación de suelo y agua, comúnmente utilizada<sup>98</sup>, que permite evaluar el impacto generado por la implementación de prácticas agrícolas<sup>99</sup>. Fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en los años 90 y ha sido empleado frecuentemente en el mundo<sup>100 101 102</sup>.

---

<sup>95</sup> *Ibíd.*

<sup>96</sup> CASTRO HUERTAS M. Andrea, *Op. Cit.*

<sup>97</sup> VERA PUERTO I. Leonardo, *Op. Cit.*

<sup>98</sup> ARNOLD J. G., WILLIAMS J. R., and MAIDMENT D. R., "Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 121, no. 2, pp. 171–183, Feb. 1995

<sup>99</sup> MITTELSTET A. R., STORM D. E., and WHITE M. J., *Op. Cit.*

<sup>100</sup> ULLRICH A. and VOLK M., "Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity," *Agric. Water Manag.*, vol. 96, no. 8, pp. 1207–1217, Aug. 2009

<sup>101</sup> MITTELSTET A. R., STORM D. E., and WHITE M. J., *Op. Cit.*

<sup>102</sup> JAYAKRISHNAN R., SRINIVASAN R., SANTHI C., and ARNOLD J. G., "Advances in the application of the SWAT model for water resources management," *Hydrol. Process.*, vol. 19, no. 3, pp. 749–762, Feb. 2005

Este modelo es integral, semi-distribuido, basado en procesos de simulación continua operando en pasos de tiempo diario<sup>103</sup> y puede desarrollarse en grandes y complejas cuencas durante periodos extensos de tiempo<sup>104 105</sup>.

El modelo necesita diferentes conjuntos de datos de entrada necesarios para la calibración y validación, dos pasos requeridos para el desarrollo de un modelo hidrológico<sup>106 107</sup>. Además, la interfaz GIS (Sistemas De Información Geográfica) de SWAT permite ingresar y manejar de manera eficiente y fácil los datos de entrada, dentro de los cuales se encuentran: mapa de elevación, mapa de suelos, precipitación diaria, temperatura (máxima y mínima), humedad relativa, velocidad del viento, prácticas de manejo de cultivos y entradas de calidad del agua<sup>108 109</sup>.

Por otro lado, la herramienta SWAT permite modelar: ciclos hidrológicos, caudal, transporte y carga de sedimentos, nutrientes, rendimientos químicos agrícolas, erosión del suelo y procesos ribereños. Igualmente, permite la simulación de prácticas de conservación como la tasa de aplicación de abonos, fertilizantes y pesticidas a los suelos alrededor de las cuencas<sup>110 111 112 113 114</sup>. Está enfocado principalmente en el análisis de la contaminación generada por fuentes no puntuales y su objetivo es establecer los posibles impactos sobre la calidad del agua a largo

---

<sup>103</sup> ARNOLD J. G., WILLIAMS J. R., and MAIDMENT D. R.,

<sup>104</sup> ULLRICH A. and VOLK M.,

<sup>105</sup> NEITSCH S. L., ARNOLD J. G., KINIRY J. R., SRINIVASAN R., and WILLIAMS J. R., "Soil and water assessment tool user's manual

<sup>106</sup> DE MELLO K., RANDHIR T. O., VALENTE R. A., and VETTORAZZI C. A., "Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds," *Ecol. Eng.*, vol. 108, pp. 514–524, Nov. 2017

<sup>107</sup> SAHU M. and GU R. R., "Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality," *Ecol. Eng.*, vol. 35, no. 8, pp. 1167–1177, Aug. 2009

<sup>108</sup> *Ibíd.*

<sup>109</sup> JAYAKRISHNAN R., SRINIVASAN R., SANTHI C., and ARNOLD J. G.,

<sup>110</sup> DE MELLO K., RANDHIR T. O., VALENTE R. A., and VETTORAZZI C. A.,

<sup>111</sup> SAHU M. and GU R. R.,

<sup>112</sup> ARNOLD J. G. and FOHRER N., "SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling," *Hydrol. Process.*, vol. 19, no. 3, pp. 563–572, Feb. 2005

<sup>113</sup> MITTELSTET A. R., STORM D. E., and WHITE M. J.,

<sup>114</sup> ULLRICH A. and VOLK M.,

plazo<sup>115 116</sup>. Las unidades de respuesta hidrológica (HUR), están basadas en el tipo de suelo, usos y pendientes del terreno<sup>117</sup>.

La calibración automática del modelo está basada en el algoritmo de Evolución Compleja (SEA-UA) que permite minimizar una función objetivo única <sup>118 119 120</sup>. El periodo de este proceso está relacionado con los datos de monitoreo disponibles y en ocasiones puede resultar difícil calibrar los parámetros de calidad del agua cuando no se tiene cobertura de datos. Por otro lado, para la validación del modelo se emplean datos del flujo del cauce de la subcuenca del río, siendo este un procedimiento común que proporciona seguridad en las estimaciones. El modelo SWAT fue empleado para evaluar el impacto sobre la calidad del agua debido a distintos usos del suelo (agricultura, bosques y áreas residenciales), comparando estos impactos entre sí para determinar las respectivas respuestas<sup>121</sup>.

En la cuenca del río Sarapuí en el sureste de Brasil se calibro el modelo inicialmente con datos de flujo de la corriente para lograr obtener parámetros de calidad del agua, luego el proceso continuo con sedimentos y finalmente nutrientes según lo establecido en los procedimientos de calibración<sup>122</sup>. Según Abbaspour y otros autores los valores de calibración de sedimentos y nutrientes deberían ser más altos que los de flujo de corriente<sup>123</sup>. Usualmente se utilizan criterios de rendimiento

---

<sup>115</sup> ARNOLD J. J., KINIRY J., SRINIVASAN R., WILLIAMS J. R. R., HANEY E. B. B., and NEITSCH S. L. L., "Soil and water assessment tool: Input/output file documentation version 2009," Texas A~ M Univ. ...., p. 662, 2011

<sup>116</sup> DE MELLO K., RANDHIR T. O., VALENTE R. A., and VETTORAZZI C. A.,

<sup>117</sup> MEHDI B. et al.,

<sup>118</sup> DE MELLO K., VALENTE R. A., RANDHIR T. O., DOS SANTOS A. C. A., and VETTORAZZI C. A., "Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone," CATENA, vol. 167, pp. 130–138, Aug. 2018

<sup>119</sup> DUAN Q. and GUPTA V., "Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models," vol. 28, no. 4, pp. 1015–1031, 1992

<sup>120</sup> SAHU M. and GU R. R.,

<sup>121</sup> DE MELLO K., RANDHIR T. O., VALENTE R. A., and VETTORAZZI C. A.,

<sup>122</sup> LOZANO L. E., ZAPATA G., , PEÑA M. A. y,

<sup>123</sup> DE MELLO K., RANDHIR T. O., VALENTE R. A., and VETTORAZZI C. A.,

numérico y gráfico que permiten evaluar el rendimiento del modelo durante los procesos de calibración y validación<sup>124</sup>.

- **QUAL2Kw**

Este modelo permite simular una corriente principal y tres corrientes secundarias, que pueden ser tratadas de manera independiente o integradas a la corriente principal, dependiendo de las necesidades del usuario<sup>125</sup>. También, permite simular el transporte y destino de diferentes parámetros fisicoquímicos y biológicos de calidad del agua<sup>126</sup>.

La interfaz gráfica que implementa el modelo es Microsoft Excel y está programado en Visual Basic<sup>127</sup>, no tiene limitaciones en el número y longitud de tramos que se pueden modelar, es unidimensional en la dirección del flujo, así mismo, el flujo del agua se simula en condiciones de flujo permanente, simulando periodos de caudal y cargas constantes en el tiempo, el calor del volumen de agua y la temperatura son simulados como función de los aspectos meteorológicos en una escala de variación diurna, el modelo simula las variables de la calidad del agua en escala de tiempo diurna, también modela un patógeno genérico (coliformes fecales o totales) <sup>128</sup>.

Además de las características ya mencionadas, QUAL2Kw presenta otras dos que lo distinguen de otros marcos como<sup>129</sup>:

1. Los flujos de oxígeno y nutrientes se calculan en función de la sedimentación de la materia orgánica particulada, las reacciones dentro de los sedimentos y las concentraciones de formas solubles en las aguas superpuestas.

---

<sup>124</sup> DE MELLO K., RANDHIR T. O., VALENTE R. A., and VETTORAZZI C. A.,

<sup>125</sup> CASTRO HUERTAS M. Andrea,

<sup>126</sup> PELLETIER G. J., CHAPRA S. C., and TAO H.,

<sup>127</sup> *Ibíd.*

<sup>128</sup> CASTRO HUERTAS M. Andrea

<sup>129</sup> PELLETIER G. J., CHAPRA S. C., and TAO H.,

2. Se modela la zona hiporreica, es decir, la zona de transición situada por debajo de los cauces de los ríos en donde el agua se filtra entre las rocas y los adoquines.

De acuerdo con lo anterior, el modelo tiene muchas ventajas respecto a otros, sin embargo, también presenta algunas limitaciones entre las cuales se encuentran: poca flexibilidad, es decir, simula parámetros y procesos limitados, y no es posible modelar los vertidos derivados de petróleo. De igual manera, por ser un modelo unidimensional, asume que el río tiene una mezcla perfecta lateral y vertical, asunción razonable para la mayoría de los ríos menos para aquellos que son particularmente anchos, profundos o con movimiento lento<sup>130</sup>.

Por otra parte, este modelo permite ingresar valores de calidad medidos de manera puntual en la corriente, el valor promedio de los datos medidos por un tiempo determinado y los valores máximos y mínimos de cada parámetro en las estaciones de monitoreo<sup>131</sup>. Para la implementación de este modelo es necesario disponer de datos históricos o actuales de las estaciones ubicadas sobre la corriente para que sea posible la calibración y validación del mismo. El proceso de calibración (Anexo 9) está encaminado en llevar un margen de error mínimo entre los datos simulados por el modelo y los valores medidos en campo<sup>132</sup>. Los métodos que se utilizan para determinar soluciones óptimas que minimicen los errores se basan en los algoritmos de optimización matemática integrados al modelo y a sus resultados; algunos de los procedimientos que se pueden mencionar dentro de los métodos de optimización son: amoeba, reconocido simulado, algoritmos genéticos, colonia de hormigas, cada uno de ellos con un proceso diferente de convergencia, costo y eficiencia computacional<sup>133</sup>. Se debe seleccionar aquel que disminuya de manera considerable el error y que converja a soluciones admisibles.

---

<sup>130</sup> CASTRO HUERTAS M. Andrea,

<sup>131</sup> VERA PUERTO I. Leonardo,

<sup>132</sup> CASTRO HUERTAS M. Andrea,

<sup>133</sup> VERA PUERTO I. Leonardo,

QUAL2Kw utiliza calibración automática de los parámetros cinéticos mediante el AG-PIKAIA, algoritmo genético (AG) que funciona como un sistema de búsqueda en un espacio de decisión. Utiliza un procedimiento análogo al de la “selección natural de las especies” de Darwin, buscando los individuos más aptos. De esta forma, el modelo determina los valores óptimos de los parámetros cinéticos (máximos y mínimos) <sup>134</sup>, maximizando la bondad de ajuste de los resultados en comparación con los datos medidos<sup>135</sup>.

La eficiencia y convergencia de la solución que se obtiene para la calibración depende de la selección de los valores que son introducidos por el usuario<sup>136</sup>. Por otra parte, un factor importante en la calibración del modelo es la definición del error que se necesita manejar, lo cual se hace bajo 2 aspectos: el primero va encaminado a la formulación matemática utilizada para el mismo y el segundo está definido en los rangos de error permitidos para que el modelo se defina como calibrado o en los niveles de confianza donde el modelo pueda ser aceptado<sup>137</sup>

Una vez terminado el proceso de calibración del modelo y establecidos cada uno de los valores de entrada, es importante corroborar el ajuste manteniendo las constantes fijas y variando la información en los puntos usados para la calibración del modelo. De esta manera y manteniendo los rangos de error establecidos, se acepta o no la validación del modelo<sup>138</sup>

## • REDES BAYESIANAS

Las redes bayesianas se han empleado para evaluar cuantitativamente la influencia de diferentes usos de la tierra y los posibles impactos negativos generados por estos sobre la calidad del agua. En este tipo de modelado interactúan variables aleatorias

---

<sup>134</sup> CASTRO HUERTAS M. Andrea

<sup>135</sup> PELLETIER G. J., CHAPRA S. C., and TAO H.,

<sup>136</sup> VERA PUERTO I. Leonardo,

<sup>137</sup> *Ibíd.*

<sup>138</sup> *Ibíd.*

para describir un proceso específico, igualmente, presenta una estructura gráfica a cíclica dirigida, que permite factorizar la distribución de probabilidad global de las variables aleatorias en una distribución de probabilidad local. Para el desarrollo del modelo de redes bayesianas se utilizó el software ArcMap caracterizado por ayudar a superponer mapas de usos de los suelos, cuerpos y puntos de muestreo de agua, determinando las respectivas áreas que drenan a cada punto de muestreo<sup>139</sup> [50].

Los datos de entrada utilizados para el modelamiento se catalogan en dos: primeramente los datos cuantitativos los cuales comprenden valores de parámetros fisicoquímicos, medidos en diferentes episodios y zonas de monitoreo situadas en la cuenca, dichos parámetros son: nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), hierro (Fe) y carbono orgánico disuelto (COD), en segunda instancia se encuentran los datos cualitativos tomando las magnitudes correspondientes a las diferentes áreas de uso de suelo encontradas en la zona de estudio, las zonas donde se implementó dicho modelo se dedicaban a actividades como: agricultura y plantaciones de tierras secas, agricultura y plantaciones de regadío, usos intensivos, entre otras. Para establecer las concentraciones de cada indicador de calidad del agua se llevó a cabo un proceso de ajuste de la función de densidad de probabilidad del modelo con los datos observados, esto a su vez permite la estimación de diferentes parámetros del modelo. Finalmente, en la investigación donde se llevó a cabo el modelado con redes bayesianas se determinó que los resultados de los análisis de datos tanto transversales como longitudinales no generan información consistente sobre la influencia de los usos del suelo en la contaminación de los recursos hídricos, igualmente no establecen información certera para todos los indicadores de calidad del agua<sup>140</sup>.

---

<sup>139</sup> WIJESIRI B., DEILAMI K., and GOONETILLEKE A., “Evaluating the relationship between temporal changes in land use and resulting water quality,” *Environ. Pollut.*, vol. 234, pp. 480–486, Mar. 2018.

<sup>140</sup> *Ibíd.*

- **BASINS**

Basins es una herramienta y sistema analítico desarrollado por la Agencia de Protección de los Estados Unidos que permite modelar los efectos del uso del suelo sobre la calidad del agua en cuencas hidrográficas, se considera confiable y sumamente útil, ya que caracteriza las condiciones de la calidad del agua y del flujo para diferentes zonas de estudio en cuencas con variedad de escala, el modelo se distingue por utilizar un entorno de Windows y un sistema de información geográfica basado en ArcView que interviene como marco integrador y permite que en la ejecución del modelo se relacionen una gran cantidad de datos como: cargas puntuales y no puntuales, datos ambientales, herramientas para la evaluación y planificación, tecnologías de gestión, igualmente, genera informes, permite la visualización de gráficos, la extracción y organización de datos, por otro lado, los análisis preliminares estadísticos y de SIG establecen si existen relaciones entre los usos del suelo y la calidad del agua en una cuenca<sup>141</sup>.

Basins fue empleado en el Estado de Ohio (Estados Unidos) en la cuenca hidrológica East Fork Little Miami, donde principalmente sus tierras son dedicadas a agricultura, esta cuenca fue seleccionada ya que contaba con la disponibilidad de datos históricos sobre el flujo de corriente en diversas áreas del río, datos sobre el clima, elevación, usos del suelo e información sobre la calidad del agua. Para su desarrollo se dividió la cuenca en subcuencas más pequeñas ubicadas cerca a alguna estación de monitoreo, acción conveniente ya que a parte de la agricultura se presentan otros usos del suelo por las expansiones suburbanas, lo que afecta de manera distinta los factores hidrológicos y por tanto los resultados del análisis y modelación<sup>142</sup>.

---

<sup>141</sup> TONG S. T. Y. and CHEN W., "Modeling the relationship between land use and surface water quality," J. Environ. Manage., vol. 66, no. 4, pp. 377–393, Dec. 2002

<sup>142</sup> *Ibíd.*

El modelo cuenta con una herramienta de delineación que permite delinear la línea divisoria y las subcuencas. Basins por defecto asume que todas las áreas urbanizadas tienen un área permeable e impermeable del 50% cada una, por otro lado, el modelo permite realizar informes sobre el uso del suelo y ajustar dichos porcentajes<sup>143</sup>. La simulación de la calidad del agua se basa en un modelo hidrológico general, por tanto, se llevan a cabo dos etapas: en la primera etapa se simulan las condiciones de flujo para cada subcuenca, donde se comparan los resultados con los registros anteriormente observados, en la segunda etapa se lleva a cabo la simulación de la calidad del agua partir de un análisis de correlación anteriormente realizado<sup>144</sup>.

En la investigación realizada en el estado de Ohio (EE.UU) se llegó a la conclusión que, si los valores de flujo evaluados en la primera etapa son cercanos a los monitoreados, el modelo hidrológico es aceptado y puede desarrollarse la segunda etapa, en la cual se determinan los parámetros que están estrechamente relacionados con los tipos de uso del suelo, por ejemplo, en dicha investigación se determinó que estos parámetros comprendían el nitrógeno total, fósforo total y los coliformes fecales, así mismo, no existían monitoreos históricos sobre otros parámetros, por tanto, se construyeron tres modelos de calidad del agua a partir de los parámetros anteriormente mencionados, fueron ejecutados para cada subcuenca y los resultados de la simulación se compararon con los datos monitoreados<sup>145</sup>. Este modelo puede adaptarse a otras cuencas realizando ciertas modificaciones y simulando otros contaminantes, con la investigación y modelización desarrollada se determinó que Basins simula efectivamente las condiciones de las corrientes en la cuenca hidrográfica total y en subcuencas de áreas más pequeñas<sup>146</sup>.

---

<sup>143</sup> *Ibíd.*

<sup>144</sup> *Ibíd.*

<sup>145</sup> *Ibíd.*

<sup>146</sup> *Ibíd.*

Para realizar el proceso de calibración el modelo Basins cuenta con varias características, ofrece ciertas estimaciones de parámetros de entrada y los usuarios tienen la posibilidad de ajustarlos manualmente, gracias esto se logran modificar los parámetros de entrada en el editor a partir del algoritmo de hidrología terrestre permeable<sup>147</sup>.

- **MODELO DE GESTION DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL PARAMETRO DE INTERVALO (IPWM)**

Este modelo es presentado como un programa lineal gris, una de sus aplicaciones se realizó en el año 1996 en el canal Beixi, situado en la provincia de Fujian, China, donde el área alrededor de dicho canal fue dividida en cinco subáreas, en las cuales, se desarrollan actividades agrícolas y pecuarias. Este modelo se caracteriza por ser aplicable a problemas prácticos ya que no conduce a modelos intermedios complicados. Frecuentemente en situaciones inciertas se presenta información de intervalo, con IPWM, dichas situaciones logran comunicarse directamente en los procesos de optimización y las soluciones resultantes, de este modo, se generan decisiones factibles a partir de la interpretación de soluciones presentadas como intervalos estables. El objetivo del desarrollo de este modelo es establecer las posibles relaciones entre los cultivos del suelo, la ganadería y actividades humanas sobre la calidad del agua, estos tres factores se consideran con características inciertas y en esta versión del modelo son consideradas como números de intervalo<sup>148</sup>.

La formulación del modelo se genera a partir de restricciones de calidad y cantidad del agua, para el análisis de la calidad se tienen en cuenta ciertas variables como: el equilibrio masivo de estiércol en la zona de estudio y el equilibrio de nutrientes de

---

<sup>147</sup> Ibid.

<sup>148</sup> HUANG G. H., "IPWM: an interval parameter water quality management model," Eng. Optim., vol. 26, no. 2, pp. 79–103, May 1996

los cultivos. En investigaciones donde se desarrolló este modelo se presentan ecuaciones en las que intervienen el suelo, los cultivos y las especies de ganado, también ecuaciones para el balance hídrico de nutrientes, como el nitrógeno considerado como un potencial contaminante de los recursos hídricos, por otro lado, en su ejecución se formulan ecuaciones que representan los principales factores ambientales relacionados con la contaminación del agua que incluyen pérdida de suelo, pérdidas totales, pérdidas disueltas de nitrógeno y fósforo, entre otros<sup>149</sup>.

- **COEFICIENTE DE EXPORTACION**

El modelo de coeficientes de exportación se caracteriza por evaluar en un periodo anual el impacto generado por los cambios en el uso del suelo y establece como interviene el suelo en situaciones anteriores en el transporte de cargas de nutrientes llevados a las corrientes y a las aguas en estado de estancamiento. Una de sus aplicaciones se llevó a cabo en la cuenca de captación de Slapton Ley situada en Inglaterra, donde predominaba la ganadería, y actividades como la producción de lácteos y ganado vacuno. Para el desarrollo del modelo es conveniente dividir la cuenca en subcuencas y establecer el porcentaje de contribución de esorrentía de cada una de ellas. En el análisis se tuvo en cuenta un factor importante como es el tiempo de contacto entre la carga de nutrientes con la vegetación y los suelos, transportados desde ciertas áreas hasta las fuentes superficiales, considerando que se puede perder gran parte de dicha carga si existe un mayor tiempo de contacto y en la ruta de transporte se encuentran áreas de bosques, estas zonas actúan como barreras de amortiguamiento reduciendo la carga neta de nutrientes en el agua<sup>150</sup>.

En dicha investigación el modelo fue elaborado empleando información recolectada sobre la agricultura a partir de encuestas sobre el uso del suelo, estimando igualmente el tamaño de la población que habitaba la zona de estudio y datos sobre

---

<sup>149</sup> *Ibíd.*

<sup>150</sup> JOHNES P. J. and HEATHWAITE A. L.,

aportaciones de la fijación del nitrógeno. Inicialmente se empleó un conjunto de coeficientes de exportación incluyendo todas las tierras de la cuenca sin tener en cuenta la cercanía a las fuentes superficiales. Fue ejecutado con los datos de entrada establecidos en años anteriores y de esta manera se brindó predicciones iniciales de las cargas de nitrógeno y fósforo concentradas en la cuenca<sup>151</sup>. Para determinar cuál es el principal parámetro que ejerce mayor control en el transporte de nutrientes a la fuente se lleva a cabo un análisis de sensibilidad en el desarrollo del modelo, donde cada parámetro se va ajustando en un valor arbitrario de +-10 mientras los demás permanecen constantes, así mismo, se evalúa el efecto en la salida del modelo para cada uno de ellos<sup>152</sup>..

Con los resultados establecidos en el análisis de sensibilidad los datos son ajustados para definir las zonas que exportan a las fuentes un mayor porcentaje de nutrientes considerados como los principales contaminantes, igualmente se ajustan los coeficientes de exportación para cada uso del suelo teniendo en cuenta la proximidad a las fuentes de agua superficial. Por ejemplo, en la investigación donde se implementó este modelo se discretizó teniendo en cuenta si estaban ubicadas a más de 50 m o menos de 50 m. En la recalibración del modelo nuevamente los coeficientes de exportación se ajustan en el rango de las latitudes templadas del norte, en este proceso se definen resultados sobre la entrada y porcentaje de exportación de nutrientes en cada área donde se desarrollaban diferentes cultivos en dicha investigación se presentaban cultivos de cereales, tubérculos, campos llenos de vegetales, cría de animales como aves de corral, cerdos, ganado, caballos entre otros<sup>153</sup>.. En el proceso de validación debido a la estructura del modelo no es posible la validación interna, pero es posible desarrollarla comparando el producto del modelo con las tendencias futuras en la calidad del agua de la zona de estudio<sup>154</sup>.

---

<sup>151</sup> *Ibíd.*

<sup>152</sup> *Ibíd.*

<sup>153</sup> *Ibíd.*

<sup>154</sup> *Ibíd.*

- **QUAL2E**

Es un modelo que simula la calidad del agua, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y se ha empleado de manera exitosa en cuerpos de agua de países como Colombia. Este modelo tiene grandes ventajas como: facilidad de manejo y, además, es adaptable a las condiciones específicas de las corrientes<sup>155</sup>. Algunas de las características generales de este modelo son: Simula cuerpos de agua como corrientes, ríos, estuario, tiene un estado estable y cuasi-dinámico<sup>156</sup>.

- **HSPF**

Es un modelo hidrológico robusto, de alta definición, flexible, fiable e integral para la simulación hidrológica de las cuencas y la calidad del agua<sup>157</sup>. También, se ha aplicado para el respaldo de estudios de modelado de la calidad del agua de las cuencas hidrográficas. Este modelo usa datos de entrada mínimos para describir las condiciones hidrológicas de la cuenca, también, puede simular los procesos hidrológicos y de calidad del agua de superficies terrestres permeables e impermeables. De igual manera, considera todos los componentes de la corriente como: escurrimiento, interferencia y base y también, sus contribuciones contaminantes. Simula la hidrólisis, oxidación, fotólisis, biodegradación y volatilización integrando procesos de escorrentía química, biológica y contaminante en las superficies terrestres, la temperatura del agua, el transporte de sedimentos, entre otras<sup>158</sup>

---

<sup>155</sup> LOZANO M. . y P. L. E., ZAPATA G., , “Modelacion de corrientes hidricas superficiales en el departamento del quindio colombia,” Semin. Int. La Hidroinformática en la Gestión Integr. los Recur. Hídricos, p. 8, 2003

<sup>156</sup> LOZANO L. E., ZAPATA G., , PEÑA M. A. y,

<sup>157</sup> PROGRAM H. S., Hydrological simulation program -- fortan: user's manual for version 11. 1996

<sup>158</sup> ANTHONY DONIGIAN S., AQUA J., HUBER W. C., and BARNWELL T. O., “Modeling of Nonpoint Source Water Quality in Urban and Non-urban Areas,” 1991

HSPF es un programa de simulación continua, es decir, se requieren los registros continuos de lluvia, evapotranspiración, temperatura e intensidad solar para llegar a las simulaciones, por lo que solo las cuencas que están cerca de una estación meteorológica con datos fiables a largo plazo se pueden utilizar para el estudio. Con los datos que continuamente se registran de precipitación y evaporación, HSPF calcula un hidrograma continuo de corriente en la salida de la cuenca y al mismo tiempo, genera un historial de la escorrentía, la carga de sedimentos y las concentraciones de nutrientes y plaguicidas<sup>159</sup>. Según el estudio realizado en el estado de Ohio (EE.UU) los parámetros del modelo se calibraron hasta que existiera concordancia entre la velocidad del flujo que estaba siendo simulada y los datos de flujo monitoreados<sup>160</sup>.

**Tabla 9. Tabla resumen de modelos de calidad del agua**

| Modelo  | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Swat    | <p><b>Descripción:</b> Modelo comúnmente empleado en el análisis hidrológico de la calidad del agua siendo este una herramienta de evaluación de suelo y agua [35] que permite determinar el impacto generado por la implementación de prácticas agrícolas [26]. Este modelo es integral, semi-distribuido, basado en procesos de simulación continua operando en pasos de tiempo diario [35].</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Flujo de corriente, sedimentos, fósforo total, NO<sub>3</sub>-N [24].</p> <p><b>Información de entrada:</b> mapa de elevación, mapa de suelos, precipitación diaria, temperatura (máxima/mínima), humedad relativa ,velocidad del viento, prácticas de manejo de cultivos, entradas de calidad del agua [40], [37].</p> <p><b>Implementado en:</b> Cuenca del río Sarapui (Brasil) (área:1550 km<sup>2</sup>) [39], Cuenca del río Pike [22] (área: 629 km<sup>2</sup>), Cuenca de Walnut Creek (Lowa) (área: 51,3km<sup>2</sup> ) [40], Cuenca Parthe (centro de Alemania) (área: 315 km<sup>2</sup>) [36].</p> <p><b>Desarrollado por:</b> Departamento de agricultura de los Estados Unidos, [36], [38], en la década de los 90 [41].</p> |
| Qual2kw | <p><b>Descripción:</b> modelo de calidad del agua, permite simular una corriente principal y tres corrientes secundarias, que pueden ser tratadas de manera independiente o integradas a la corriente principal dependiendo de las necesidades del usuario [7]. También, permite simular el transporte y destino de diferentes parámetros fisicoquímicos de calidad del agua [32].</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo temperatura y caudal [32].</p> <p><b>Implementado en:</b> Subcuenca hidrológica del río Guacaica (Caldas, Colombia),(área: 387,1 km<sup>2</sup>) [7] .</p> <p><b>Desarrollado por:</b> Chapra y Pelletier para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), 2008 [7].</p>                                                                                                                                                                  |

<sup>159</sup> Ibíd.

<sup>160</sup> TONG S. T. Y. and CHEN W.,

|                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Bayesian Network</b>           | <p><b>Descripción:</b> Modelo empleado para evaluar cuantitativamente la influencia de diferentes usos de la tierra y los posibles impactos negativos generados por estos sobre la calidad del agua [45].</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Nitratos, Fosfatos, hierro, DOC [45].</p> <p><b>Información de entrada:</b> Datos cuantitativos: valores de parámetros fisicoquímicos medidos con anterioridad en la cuenca, datos cualitativos: magnitudes correspondientes a valores de áreas de los diferentes usos del suelo desarrollados alrededor de la cuenca de estudio [45].</p> <p><b>Implementado en:</b> Cuenca Ningi Creek (Australia ) (área: 47,1 km<sup>2</sup>) [45].</p>                                                                                                                                                                                      |
| <b>HSPF</b>                       | <p><b>Descripción:</b> modelo hidrológico robusto, de alta definición, flexible, fiable e integral para la simulación hidrológica de las cuencas y la calidad del agua [49].</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> hidrólisis, oxidación, fotólisis, biodegradación y volatilización integrando procesos de escurrimiento química, biológica y contaminante en las superficies terrestres, la temperatura del agua, el transporte de sedimentos, entre otras [50].</p> <p><b>Información de entrada:</b> requieren registros continuos de lluvia, evapotranspiración, temperatura e intensidad solar para conducir las simulaciones [50].</p> <p><b>Implementado en:</b> Cuenca East Fork Little Miami (Estado de Ohio) (área: 7,2 km<sup>2</sup>) [46].</p> <p><b>Desarrollado por:</b> Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, en la década de los 90 [46].</p> |
| <b>Basins</b>                     | <p><b>Descripción:</b> Herramienta y sistema analítico que permite modelar los efectos del uso de la tierra sobre la calidad del agua en cuencas hidrográficas, se considera confiable y sumamente útil, ya que caracteriza las condiciones de la calidad del agua y del flujo para diferentes zonas de estudio en cuencas con variedad de escala [46]</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Conductividad, DBO, PH, nitrógeno total, fósforo total, sodio, magnesio, coliformes fecales [46].</p> <p><b>Implementado en:</b> Cuenca East Fork Little Miami (Estado de Ohio)( área: 7,2 km<sup>2</sup> ) [46].</p> <p><b>Desarrollado por:</b> Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA),1996 [46] .</p>                                                                                                                                                       |
| <b>IPWM</b>                       | <p><b>Descripción:</b> El objetivo del modelo es establecer las posibles relaciones entre, los cultivos del suelo, la ganadería y actividades humanas sobre la calidad del agua, estos tres factores se consideraban con características inciertas y en esta versión del modelo solo pueden conocerse como números de intervalo [47]</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Sedimentos, nitrógeno y fósforo [47].</p> <p><b>Implementado en:</b> Canal Beixi (Provincia de Fujian, China) (área: 23,2 km<sup>2</sup>) [47].</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Qual2E</b>                     | <p><b>Descripción:</b> Es un modelo que simula la calidad del agua, tiene grandes ventajas como: facilidad de manejo y, además, es adaptable a las condiciones específicas de las corrientes [48].</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, nutrientes, organismos coliformes [48].</p> <p><b>Información de entrada:</b> datos cartográficos e históricos de precipitaciones, caudales [48].</p> <p><b>Implementado en:</b> Cuencas de los ríos Quindío y Roble y la quebrada Cristales (Colombia) (área: 2790 km<sup>2</sup>) [48].</p> <p><b>Desarrollado por:</b> Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA),1985 [48].</p>                                                                                                                                                                                   |
| <b>Coeficiente de exportación</b> | <p><b>Descripción:</b> El modelo de coeficientes de exportación se caracteriza por evaluar en un periodo anual el impacto generado por los cambios en el uso del suelo y establece como interviene el suelo en situaciones anteriores en el transporte de cargas de nutrientes llevados a las corrientes y a las aguas en estado de estancamiento [29].</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> nitrógeno y fósforo [29].</p> <p><b>Información de entrada:</b> datos sobre uso del suelo, tamaño de población, datos sobre aportaciones de fijación de nitrógeno [29].</p> <p><b>Implementado en:</b> Cuenca Slapton Ley (área: 36,8 km<sup>2</sup>) [29].</p>                                                                                                                                                                                                                    |

### 3. CONCLUSIONES

Al desarrollar actividades productivas como la agricultura y la ganadería en los ecosistemas de alta montaña, para suplir ciertas necesidades de alimentos, ingresos económicos, vivienda de los grupos sociales que habitan estos territorios, entre otros, conlleva a la contaminación y degradación de los recursos hídricos, estableciendo como principal fuente de contaminación las actividades agrícolas<sup>161</sup>. La inadecuada gestión de las actividades antropogénicas aumenta las concentraciones de sedimentos generados en áreas con poca cubierta forestal, la cual permite la retención de sedimentos<sup>162</sup>, así mismo, los bosques ribereños actúan como amortiguadores y pueden causar efectos de disolución de los contaminantes<sup>163</sup>.

Es importante clasificar los usos del suelo en toda la cuenca para establecer la influencia de cada una de ellas, proporcionando información concreta de la calidad del agua<sup>164</sup>. Además, es complejo evaluar la relación entre el uso del suelo y la calidad del agua debido a la cantidad de parámetros fisicoquímicos y biológicos que deben ser analizados, esto se ve reflejado en las diferentes investigaciones ya que no en todas se contaba con el análisis de todos los parámetros, por tanto, los más frecuentes fueron: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), temperatura y fósforo total.

---

<sup>161</sup> RUIZ D. M., MARTÍNEZ IDROBO J. P., OTERO SARMIENTO J. D., and FIGUEROA CASAS A.,

<sup>162</sup> DE PAULA F. R., GERHARD P., FERRAZ S. F. de B., and WENGER S. J., "Multi-scale assessment of forest cover in an agricultural landscape of Southeastern Brazil: Implications for management and conservation of stream habitat and water quality," *Ecol. Indic.*, vol. 85, pp. 1181–1191, Feb. 2018

<sup>163</sup> MEHDI B. et al.,

<sup>164</sup> BUCK O., NIYOGI D. K., and TOWNSEND C. R., "Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural catchments," *Environ. Pollut.*, vol. 130, no. 2, pp. 287–299, Jul. 2004

El muestreo realizado para la evaluación de la calidad del agua en intervalos de tiempo fijo en muchas ocasiones no proporciona información completa para determinar la influencia del uso<sup>165</sup>, estableciendo solo una breve situación del sistema analizado<sup>166</sup>, por tanto, varios autores afirman la importancia de tener en cuenta los cambios estacionales para determinar la exportación de nutrientes a las corrientes, y la importancia de incluir eventos extremos en los protocolos de monitoreo, por ejemplo casos de inundación<sup>167</sup>. La frecuencia del muestreo que se realizó para la evaluación de la calidad del agua en los estudios analizados fue la siguiente: comúnmente se realizan de 3 a 10 puntos de monitoreo, el tiempo de estudio entre 2 y 10 meses teniendo en cuenta los periodos estacionales, se recolectan entre 2 y 3 muestras por punto de monitoreo y se lleva a cabo generalmente muestreo puntual y siguiendo la masa de agua.

Los modelos para evaluar la calidad del agua son herramientas útiles e invaluable<sup>168</sup> que han evolucionado y perfeccionado con el tiempo<sup>169</sup>. Frecuentemente los datos necesarios para su ejecución no están disponibles o son limitados<sup>170</sup>, pues, dependiendo de la magnitud de la cuenca se necesitarán diferentes datos para establecer los efectos del uso del uso sobre la calidad de las fuentes superficiales<sup>171</sup> [57], por tanto, su implementación depende de la disponibilidad de información y datos que se tengan de la cuenca, igualmente depende de la modelación y de los procesos que requieran ser modelados. Su empleo ha demostrado que las tierras agrícolas producen niveles elevados de

---

<sup>165</sup> *Ibíd.*

<sup>166</sup> KÄNDLER M. et al.,

<sup>167</sup> BUCK O., NIYOGI D. K., and TOWNSEND C. R.,

<sup>168</sup> MITTELSTET A. R., STORM D. E., and WHITE M. J.,

<sup>169</sup> VAN DER HOVEN C., UBOMBA-JASWA E., VAN DER MERWE B., LOUBSER M., and ABIA A. L. K.

<sup>170</sup> FAN C., KO C.-H., and WANG W.-S.,

<sup>171</sup> BUCK O., NIYOGI D. K., and TOWNSEND C. R.,

nutrientes como fósforo y nitrógeno<sup>172</sup> y permiten simular procesos e impactos de cargas contaminantes<sup>173</sup>.

En la revisión de literatura se determina que es complejo evaluar la relación entre el uso del suelo y la calidad del agua debido a la gran cantidad de parámetros fisicoquímicos que deben ser analizados para tomar una postura y la complejidad de los procesos utilizados<sup>174 175 176 177</sup>, estos se ven afectados por las condiciones meteorológicas e hidrológicas de la zona, por ejemplo la escorrentía y la precipitación<sup>178 179 180</sup>, lo que se ve reflejado en las diferentes investigaciones pues no en todas se contaba con el análisis de todos los parámetros, sino que estaban centrados en los que se consideraban más relevantes. Algunas limitaciones para realizar la evaluación de la calidad del agua incluyen eventos climáticos, mediciones inciertas de nutrientes en las corrientes, poca información sobre las prácticas ejecutadas en las zonas a estudiar, y programas de monitoreo insuficientes<sup>181</sup>.

---

<sup>172</sup> TONG S. T. Y. and CHEN W.,

<sup>173</sup> VAN DER HOVEN C., UBOMBA-JASWA E., VAN DER MERWE B., LOUBSER M., and ABIA A. L. K.,

<sup>174</sup> SELLE B., SCHWIENTEK M., and LISCHIED G., "Understanding processes governing water quality in catchments using principal component scores," *J. Hydrol.*, vol. 486, pp. 31–38, Apr. 2013

<sup>175</sup> CAREY R. O. et al., "Evaluating nutrient impacts in urban watersheds: Challenges and research opportunities," *Environ. Pollut.*, vol. 173, pp. 138–149, Feb. 2013.

<sup>176</sup> BAKER A., "Land use and water quality," *Hydrol. Process.*, vol. 17, no. 12, pp. 2499–2501, Aug. 2003

<sup>177</sup> ALLAN J. D., "Landscapes and Riverscapes: The Influence of Land Use on Stream Ecosystems," *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 257–284, Dec. 2004

<sup>178</sup> SHRESTHA S. and KAZAMA F., "Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan," *Environ. Model. Softw.*, vol. 22, no. 4, pp. 464–475, Apr. 2007

<sup>179</sup> GOONETILLEKE A., THOMAS E., GINN S., and GILBERT D., "Understanding the role of land use in urban stormwater quality management," *J. Environ. Manage.*, vol. 74, no. 1, pp. 31–42, Jan. 2005

<sup>180</sup> SINGH K. P., MALIK A., MOHAN D., and SINHA S., "Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)—a case study," *Water Res.*, vol. 38, no. 18, pp. 3980–3992, Nov. 2004

<sup>181</sup> MELLAND A. R., FENTON O., and JORDAN P., "Effects of agricultural land management changes on surface water quality: A review of meso-scale catchment research," *Environ. Sci. Policy*, vol. 84, pp. 19–25, Jun. 2018

## BIBLIOGRAFÍA

ALLAN J. D., "Landscapes and Riverscapes: The Influence of Land Use on Stream Ecosystems," *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 257–284, Dec. 2004.

ALMEIDA S., BULYGINA N., MCINTYRE N., WAGENER T., and BUYTAERT W., "Improving parameter priors for data-scarce estimation problems," *Water Resour. Res.*, vol. 49, pp. 6090–6095, 2013.

ANTHONY DONIGIAN S., AQUA J., HUBER W. C., and BARNWELL T. O., "Modeling of Nonpoint Source Water Quality in Urban and Non-urban Areas," 1991.

ARNOLD J. G. and FOHRER N., "SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling," *Hydrol. Process.*, vol. 19, no. 3, pp. 563–572, Feb. 2005.

ARNOLD J. G., WILLIAMS J. R., and MAIDMENT D. R., "Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 121, no. 2, pp. 171–183, Feb. 1995.

ARNOLD J. J., KINIRY J., SRINIVASAN R., WILLIAMS J. R. R., HANEY E. B. B., and NEITSCH S. L. L., "Soil and water assessment tool: Input/output file documentation version 2009," *Texas A~ M Univ. ...*, p. 662, 2011.

BAKER A., "Land use and water quality," *Hydrol. Process.*, vol. 17, no. 12, pp. 2499–2501, Aug. 2003.

BAKIR OGUTVEREN Ü., ALBEK, LKER M. BAKIR O., and ALBEK E., “Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. J Hydrol Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF.”

BROETTO T., TORNQUIST C. G., DE CAMPOS B.-H. C., and SCHNEIDER J. C., “Relationships between Agriculture, Riparian Vegetation, and Surface Water Quality in Watersheds,” *Rev. Bras. Ciência do Solo*, vol. 41, no. 0, 2017.

BUCK O., NIYOGI D. K., and TOWNSEND C. R., “Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural catchments,” *Environ. Pollut.*, vol. 130, no. 2, pp. 287–299, Jul. 2004.

BURNEO P. C. and GUNKEL G., “Ecology of a high Andean stream, Rio Itambi, Otavalo, Ecuador,” *Limnol. - Ecol. Manag. Int. Waters*, vol. 33, no. 1, pp. 29–43, Apr. 2003.

BUYTAERT W. et al., “Human impact on the hydrology of the Andean páramos,” *Earth-Science Rev.*, vol. 79, no. 1–2, pp. 53–72, Nov. 2006.

BUYTAERT W., DECKERS J., and WYSEURE G., “Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo),” *Geomorphology*, vol. 73, no. 3–4, pp. 207–221, Feb. 2006.

CAREY R. O. et al., “Evaluating nutrient impacts in urban watersheds: Challenges and research opportunities,” *Environ. Pollut.*, vol. 173, pp. 138–149, Feb. 2013.

CARR G. M., NEARY J. P., GEMS/Water (Programme), and United Nations Environment Programme., *Water quality for ecosystem and human health*. UN GEMS/Water Programme Office, 2008.

CASTRO HUERTAS M. Andrea, “Aplicación del QUAL2Kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de caldas Colombia.,” 2015.

CHAPMAN Deborah, Ed., *Water Quality Assessments-A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring-Second Edition*, Second edi. E&FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 1992.

DE MELLO K., RANDHIR T. O., VALENTE R. A., and VETTORAZZI C. A., “Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds,” *Ecol. Eng.*, vol. 108, pp. 514–524, Nov. 2017.

DE MELLO K., VALENTE R. A., RANDHIR T. O., DOS SANTOS A. C. A., and VETTORAZZI C. A., “Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone,” *CATENA*, vol. 167, pp. 130–138, Aug. 2018.

DE PAULA F. R., GERHARD P., FERRAZ S. F. de B., and WENGER S. J., “Multi-scale assessment of forest cover in an agricultural landscape of Southeastern Brazil: Implications for management and conservation of stream habitat and water quality,” *Ecol. Indic.*, vol. 85, pp. 1181–1191, Feb. 2018.

DE SOUZA M. M. and GASTALDINI M. do C. C., “Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos,” *Eng. Sanit. e Ambient.*, vol. 19, no. 3, pp. 263–274, Sep. 2014.

DUAN Q. and GUPTA V., “Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models,” vol. 28, no. 4, pp. 1015–1031, 1992.

ESPINOSA J. and RIVERA D., "Variations in water resources availability at the Ecuadorian páramo due to land-use changes," *Environ. Earth Sci.*, vol. 75, no. 16, p. 1173, Aug. 2016.

FAN C., KO C.-H., and WANG W.-S., "An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation," *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 5, pp. 1824–1832, Apr. 2009.

FLYNN R. M. et al., "Using microbiological tracers to assess the impact of winter land use restrictions on the quality of stream headwaters in a small catchment," *Sci. Total Environ.*, vol. 541, pp. 949–956, Jan. 2016.

GOONETILLEKE A., THOMAS E., GINN S., and GILBERT D., "Understanding the role of land use in urban stormwater quality management," *J. Environ. Manage.*, vol. 74, no. 1, pp. 31–42, Jan. 2005.

HART M. R., QUIN B. F., and NGUYEN M. L., "Phosphorus Runoff from Agricultural Land and Direct Fertilizer Effects," *J. Environ. Qual.*, vol. 33, no. 6, p. 1954, Nov. 2004.

HE Z., WENG H., HO H.-C., RAN Q., and MAO M., "Soil erosion and pollutant transport during rainfall-runoff processes," *Water Resour.*, vol. 41, no. 5, pp. 604–611, Sep. 2014.

HUANG G. H., "IPWM: an interval parameter water quality management model," *Eng. Optim.*, vol. 26, no. 2, pp. 79–103, May 1996.

JAYAKRISHNAN R., SRINIVASAN R., SANTHI C., and ARNOLD J. G., "Advances in the application of the SWAT model for water resources management," *Hydrol. Process.*, vol. 19, no. 3, pp. 749–762, Feb. 2005.

JOHNES P. J. and HEATHWAITE A. L., “Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments,” *Hydrol. Process.*, vol. 11, no. 3, pp. 269–286, Mar. 1997.

JOHNSON J. D., JIN Robert C., CARREIRO Hwa-Seong, JACK Margaret M., “Macroinvertebrate community structure, secondary production and trophic-level dynamics in urban streams affected by non-point-source pollution,” *Freshw. Biol.*, vol. 58, no. 5, pp. 843–857, May 2013.

KÄNDLER M. et al., “Impact of land use on water quality in the upper Nisa catchment in the Czech Republic and in Germany,” *Sci. Total Environ.*, vol. 586, pp. 1316–1325, May 2017.

LOZANO L. E., ZAPATA G., , PEÑA M. A. y, “Selección del modelo de simulación de calidad de agua en el proyecto "modelación de corrientes hídricas superficiales en el departamento del quindío",” *Grup. Investig. Desarro. y Estud. del Recur. Hídrico y el Ambient. - CIDERA*, p. 8, 2003.

LOZANO M. . y P. L. E., ZAPATA G., , “Modelación de corrientes hídricas superficiales en el departamento del quindío colombia,” *Semin. Int. La Hidroinformática en la Gestión Integr. los Recur. Hídricos*, p. 8, 2003.

MEHDI B. et al., “Simulated impacts of climate change and agricultural land use change on surface water quality with and without adaptation management strategies,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 213, pp. 47–60, Dec. 2015.

MELLAND A. R., FENTON O., and JORDAN P., “Effects of agricultural land management changes on surface water quality: A review of meso-scale catchment research,” *Environ. Sci. Policy*, vol. 84, pp. 19–25, Jun. 2018.

MICHAEL A., SCHMIDT J., W ENKE., DEUTSCHLÄNDER T., and MALITZ G., “Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss—results of comparative model simulations,” CATENA, vol. 61, no. 2–3, pp. 155–164, Jun. 2005.

MITTELSTET A. R., STORM D. E., and WHITE M. J., “Using SWAT to enhance watershed-based plans to meet numeric water quality standards,” Sustain. Water Qual. Ecol., vol. 7, pp. 5–21, May 2016.

MOURI G., TAKIZAWA S., and OKI T., “Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact,” J. Environ. Manage., vol. 92, no. 7, pp. 1837–1848, Jul. 2011.

NAVARRO R. Maria Olga, “Demanda Bioquímica de Oxígeno,” 2007.

NEITSCH S. L., ARNOLD J. G., KINIRY J. R., SRINIVASAN R., and WILLIAMS J. R., “Soil and water assessment tool user’s manual.”

OTERO J. D., FIGUEROA A., MUÑOZ F. A., and PEÑA M. R., “Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area,” Ecol. Eng., vol. 37, no. 12, pp. 2035–2043, Dec. 2011.

PELLETIER G. J., CHAPRA S. C., and TAO H., “QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration,” Environ. Model. Softw., vol. 21, no. 3, pp. 419–425, Mar. 2006.

PENG T.-R., LIN H.-J., WANG C.-H., LIU T.-S., and KAO S.-J., “Pollution and variation of stream nitrate in a protected high-mountain watershed of Central Taiwan: evidence from nitrate concentration and nitrogen and oxygen isotope compositions,” Environ. Monit. Assess., vol. 184, no. 8, pp. 4985–4998, Aug. 2012.

PROGRAM H. S., Hydrological simulation program -- fortan: user's manual for version 11. 1996.

R. DE COLOMBIA MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE et al., "Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña colombiana," Prim. Edición Bogotá D.C, 2002.

ROLDÁN PÉREZ G., Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. 1996.

RUDAS J. S., GÓMEZ L. M., and TORO A. O., Prospectiva (Universidad Autonoma del Caribe - Colombia). Universidad Autonoma del Caribe, 2013.

RUIZ D. M., MARTÍNEZ IDROBO J. P., OTERO SARMIENTO J. D., and FIGUEROA CASAS A., "Effects of productive activities on the water quality for human consumption in an andean basin, a case study," Rev. Int. Contam. Ambient., vol. 33, no. 3, pp. 361–375, Aug. 2017.

SAHU M. and GU R. R., "Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality," Ecol. Eng., vol. 35, no. 8, pp. 1167–1177, Aug. 2009.

SANABRIA SUAREZ D., "Fósforo total en agua por digestión ácida, método del ácido ascórbico," Ideam-Meteo, vol. 2, pp. 1–14, 2004.

SELLE B., SCHWIENTEK M., and LISCHIED G., "Understanding processes governing water quality in catchments using principal component scores," J. Hydrol., vol. 486, pp. 31–38, Apr. 2013.

SHI P., ZHANG Y., LI Z., LI P., and XU G., “Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales,” *CATENA*, vol. 151, pp. 182–190, Apr. 2017.

SHRESTHA S. and KAZAMA F., “Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 22, no. 4, pp. 464–475, Apr. 2007.

SINGH K. P., MALIK A., MOHAN D., and SINHA S., “Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)—a case study,” *Water Res.*, vol. 38, no. 18, pp. 3980–3992, Nov. 2004.

TANAKA M. O., DE SOUZA A. L. T., MOSCHINI L. E., and DE OLIVEIRA A. K., “Influence of watershed land use and riparian characteristics on biological indicators of stream water quality in southeastern Brazil,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 216, pp. 333–339, Jan. 2016.

TONG S. T. Y. and CHEN W., “Modeling the relationship between land use and surface water quality,” *J. Environ. Manage.*, vol. 66, no. 4, pp. 377–393, Dec. 2002.

ULLRICH A. and VOLK M., “Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity,” *Agric. Water Manag.*, vol. 96, no. 8, pp. 1207–1217, Aug. 2009.

VAN DER HOVEN C., UBOMBA-JASWA E., VAN DER MERWE B., LOUBSER M., and ABIA A. L. K., “The impact of various land uses on the microbial and physicochemical quality of surface water bodies in developing countries: Prioritisation of water resources management areas,” *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 8, pp. 280–289, Dec. 2017.

VERA PUERTO I. Leonardo, “Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo qual2k como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D. C.,” 2007.

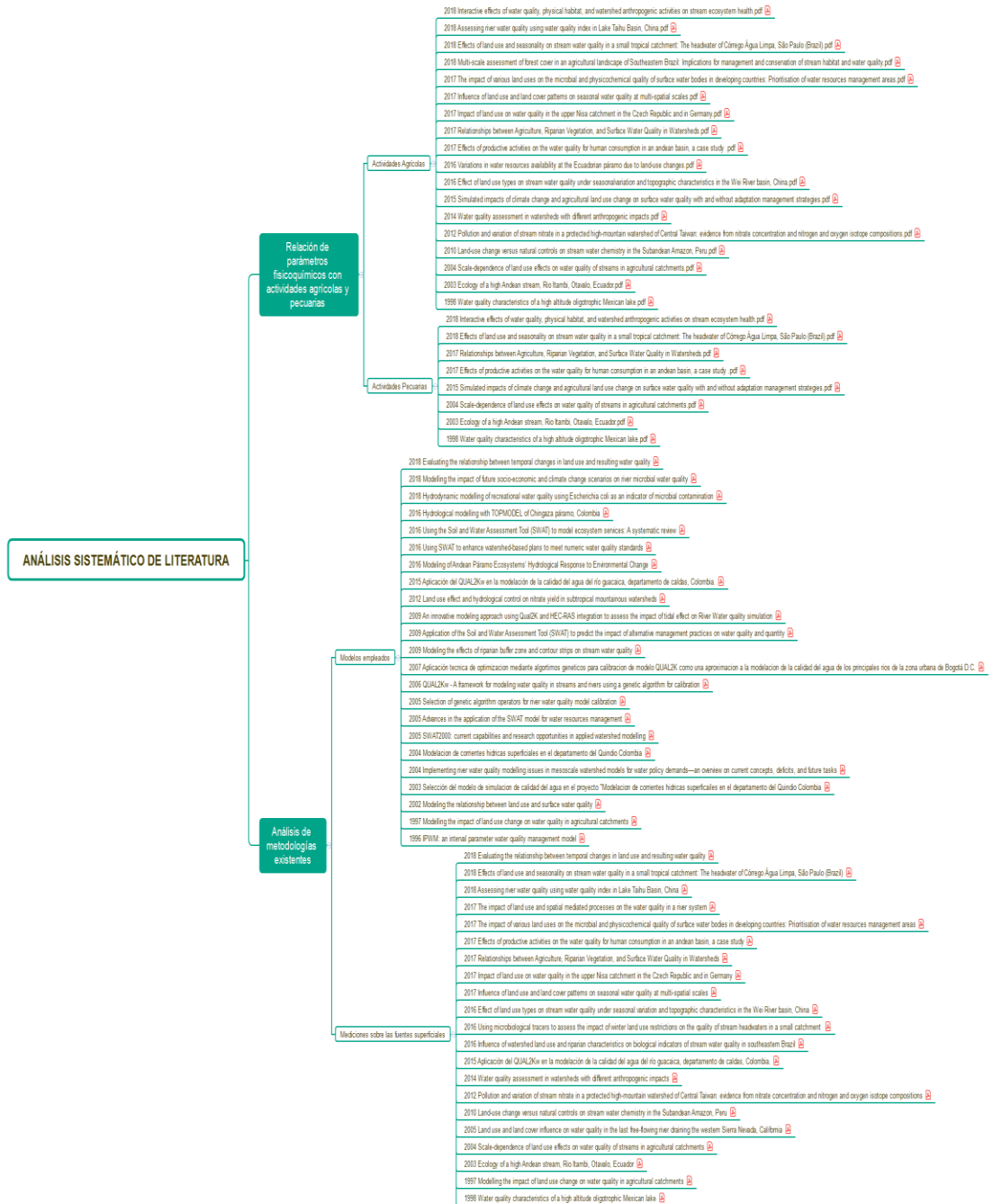
WAITE T. D., “Introduction to Water Quality Concepts,” in Principles of Water Quality, Elsevier, 1984, pp. 1–9.

WIJESIRI B., DEILAMI K., and GOONETILLEKE A., “Evaluating the relationship between temporal changes in land use and resulting water quality,” Environ. Pollut., vol. 234, pp. 480–486, Mar. 2018.

YU S., XU Z., WU W., and ZUO D., “Effect of land use types on stream water quality under seasonal variation and topographic characteristics in the Wei River basin, China,” Ecol. Indic., vol. 60, pp. 202–212, Jan. 2016.

# ANEXOS

## Anexo A. Esquema de organización de artículos en la herramienta X-Mind



## Anexo B. 59 documentos seleccionados

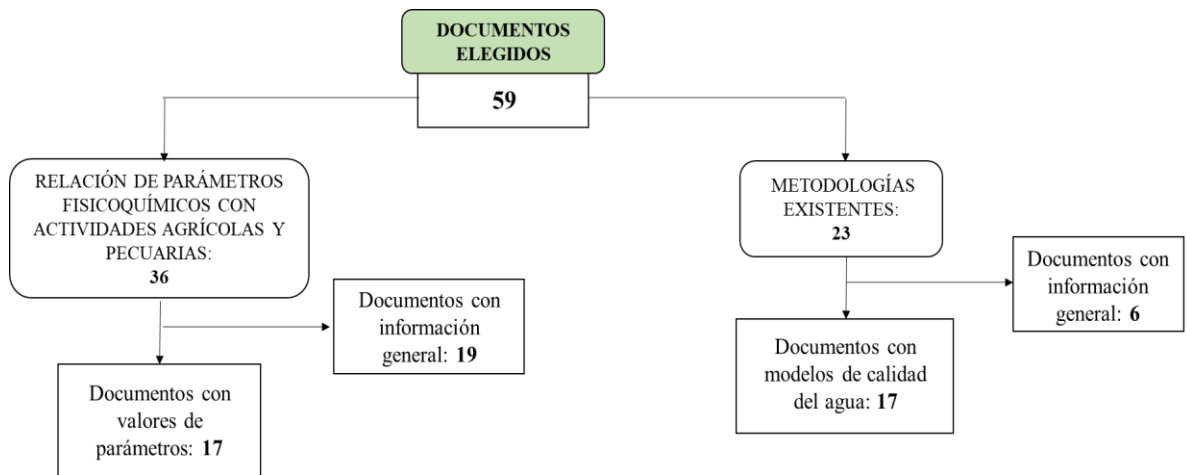
| TITLE                                                                                                                                                                            | AUTOR                                                                                                             | AÑO DE PUBLICACIÓN | TIPO DE DOCUMENTO                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| QUAL2Kw - A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration                                                                 | Gregory J. Pelletier , Steven C. Chapra , Hua Tao                                                                 | 2006               | Artículo científico              |
| Aplicación del QUAL2Kw en la modelación de la calidad del agua del río guacaica, departamento de caldas, Colombia.                                                               | Mayra Andrea Castro Huertas                                                                                       | 2015               | Trabajo de maestría - U Nacional |
| Effects of agricultural land management changes on surface water quality: A review of meso-scale catchment research                                                              | A.R. Mellanda, O. Fentonc, P. Jordan                                                                              | 2018               | Artículo científico              |
| Evaluating the relationship between temporal changes in land use and resulting water quality                                                                                     | Buddhi Wijesiri, Kaveh Deilami, Ashantha Goonetilleke                                                             | 2018               | Artículo científico              |
| Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales                                                                                  | Peng Shi, Yan Zhang, Zhanbin Li, Peng Li, Guoce Xu                                                                | 2017               | Artículo científico              |
| Influence of watershed land use and riparian characteristics on biological indicators of stream water quality in southeastern Brazil                                             | Marcel Okamoto Tanaka, Andréa Lúcia Teixeira de Souza, Luiz Eduardo Moschini, Alexandre Kannebley de Oliveira     | 2016               | Artículo científico              |
| Interactive effects of water quality, physical habitat, and watershed anthropogenic activities on stream ecosystem health                                                        | Hehuan Liao, Emily Sarver, Leigh-Anne H. Krometis                                                                 | 2018               | Artículo científico              |
| Multi-scale assessment of forest cover in an agricultural landscape of Southeastern Brazil: Implications for management and conservation of stream habitat and water quality     | Felipe Rossetti de Paula, Pedro Gerhard, Silvio Frosini de Barros Ferraz, Seth J. Wengerd                         | 2018               | Artículo científico              |
| Relationships between Agriculture, Riparian Vegetation, and Surface Water Quality in Watersheds                                                                                  | Tiago Broetto, Carlos Gustavo Tornquist, Ben-Hur Costa de Campos and Júlio César Schneider                        | 2017               | Artículo científico              |
| Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds                                                                                            | Kaline de Mello, Timothy O. Randhir, Roberta Avena Valente, Carlos Alberto Vettorazzi                             | 2017               | Artículo científico              |
| Simulated impacts of climate change and agricultural land use change on surface water quality with and without adaptation management strategies                                  | Mehdi B., Lehner B., Gombault C., michaud A., Beaudin I., Sottile M.-F., Blondlot A.                              | 2015               | Artículo científico              |
| The impact of land use and spatial mediated processes on the water quality in a river system                                                                                     | Dirk Vrebos, Olivier Beauchard, Patrick Meire                                                                     | 2017               | Artículo científico              |
| The impact of various land uses on the microbial and physicochemical quality of surface water bodies in developing countries: Prioritisation of water resources management areas | Christian van der Hoven, Eunice Ubomba-Jaswa, Barend van der Merwe, Michael Loubser, Akebe Luther King Abia       | 2017               | Artículo científico              |
| Using microbiological tracers to assess the impact of winter land use restrictions on the quality of stream headwaters in a small catchment                                      | Raymond M. Flynn, Jenny Deakin, Marie Archbold, Hugh Cushnana, Kate Kilroy, Vincent O'Flaherty, Bruce D. Misstear | 2016               | Artículo científico              |
| Water quality assessment in watersheds with different anthropogenic impacts                                                                                                      | Marielle Medeiros de Souza, Maria do Carmo Cauduro Gastaldini                                                     | 2014               | Artículo científico              |
| Effects of productive activities on the water quality for human consumption in an andean basin, a case study                                                                     | Diana Marcela RUIZ, Juan Pablo MARTÍNEZ IDROBO, Juan Diego OTERO SARMIENTO and Apolinar FIGUEROA CASAS            | 2017               | Artículo científico              |
| Human impact on the hydrology of the Andean páramos                                                                                                                              | Wouter Buytaert, Rolando Céleri, Bert De Bièvre, Felipe Cisneros, Guido Wyseure, Jozef Deckers, Robert Hofstede   | 2006               | Artículo científico              |

|                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |      |                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------------------|
| Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes                                                                                                         | Carol P. Harden                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2006 | Artículo científico |
| Implementing river water quality modelling issues in mesoscale watershed models for water policy demands—an overview on current concepts, deficits, and future tasks                 | Andreas L. Horn, Francisco J. Rueda, Georg Hörmann, Nicola Fohrer                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2004 | Artículo científico |
| Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area                                                                                     | J.D. Otero, A. Figueroa, F.A. Muñoz, M.R. Peña                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 2011 | Artículo científico |
| Hydrological modelling with TOPMODEL of Chingaza páramo, Colombia                                                                                                                    | Eydlith Giralza Gil and Conrado Tobón                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2016 | Artículo científico |
| Modeling of Andean Páramo Ecosystems' Hydrological Response to Environmental Change                                                                                                  | Francisco Flores-López, S. E. Galatsi, Marisa Escobar and David Purkey                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2016 | Artículo científico |
| Soil Erosion and Pollutant Transport during Rainfall Runoff Processes                                                                                                                | Zhiguo He, Haoxuan Weng, Hao Che Ho, Qihua Ran, and Miaohua Mao                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2014 | Artículo científico |
| Variations in water resources availability at the Ecuadorian páramo due to land-use changes                                                                                          | Jorge Espinosa, Diego Rivera                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2016 | Artículo científico |
| Pollution and variation of stream nitrate in a protected high-mountain watershed of Central Taiwan: evidence from nitrate concentration and nitrogen and oxygen isotope compositions | Tsung-Ren Peng & Hsing-Juh Lin & Chung-Ho Wang & Tsang-Sen Liu & Shuh-Ji Kao                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2012 | Artículo científico |
| Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality                                                                                              | Mahesh Sahu, Roy R. Gu                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2009 | Artículo científico |
| Land use effect and hydrological control on nitrate yield in subtropical mountainous watersheds                                                                                      | J.-C. Huang, T.-Y. Lee, S.-J. Kao, S.-C. Hsu, H.-J. Lin, and T.-R. Peng <sup>5</sup>                                                                                                                                                                                                                                                             | 2012 | Artículo científico |
| Impact of land use on water quality in the upper Nisa catchment in the Czech Republic and in Germany                                                                                 | Matthias Kändler, Katja Blechinger, Christina Seidler, Vilém Pavlů, Martin Šanda, Tomáš Dostál, Josef Krása, Tomáš Vítvar, Martin Štich                                                                                                                                                                                                          | 2017 | Artículo científico |
| Effects of land use and seasonality on stream water quality in a small tropical catchment: The headwater of Córrego Água Limpa, São Paulo (Brazil)                                   | Valdemir Rodrigues, Joan Estrany, Mauricio Ranzini, Valdir de Cicco, José M <sup>a</sup> . Tarjuelo Martín-Benito, Javier Hedo, Manuel E. Lucas-Borja                                                                                                                                                                                            | 2018 | Artículo científico |
| Global Consequences of Land Use                                                                                                                                                      | Jonathan A. Foley, Ruth DeFries, Gregory P. Asner, Carol Barford, Gordon Bonan, Stephen R. Carpenter, F. Stuart Chapin, Michael T. Coe, Gretchen C. Daily, Holly K. Gibbs, Joseph H. Helkowski, Tracey Holloway, Erica A. Howard, Christopher J. Kucharik, Chad Monfreda, Jonathan A. Patz, I. Colin Prentice, Navin Ramankutty, Peter K. Snyder | 2005 | Artículo científico |
| SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling                                                                                             | J. G. Arnold and N. Fohrer                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2005 | Artículo científico |
| Phosphorus Runoff from Agricultural Land and Direct Fertilizer Effects                                                                                                               | Murray R. Hart, Bert F. Quin, and M. Long Nguyen                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2004 | Artículo científico |
| Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California                                                     | Dylan S. Ahearna, Richard W. Sheibleya, Randy A. Dahlgren, Michael Anderson, Joshua Johnson, Kenneth W. Tate                                                                                                                                                                                                                                     | 2005 | Artículo científico |
| Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments                                                                                                  | P. J. JOHNES AND A. L. HEATHWAITE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1997 | Artículo científico |

|                                                                                                                                                          |                                                                                                  |      |                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------------------|
| Modeling the relationship between land use and surface water quality                                                                                     | Susanna T. Y. Tong* and Wenli Chen                                                               | 2002 | Artículo científico |
| Effect of land use types on stream water quality under seasonal variation and topographic characteristics in the Wei River basin, China                  | Songyan Yu, Zongxue Xu, Wei Wu, Depeng Zuo                                                       | 2016 | Artículo científico |
| Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review                                                         | Francesconi, W., Srinivasan, R., Pérez-Miñana, E., Willcock, S.P., Quintero, M.                  | 2016 | Artículo científico |
| Hydrologic and Water Quality Impacts of Agricultural Drainage                                                                                            | R. W. Skaggs, M. A. Brevé and J. W. Gilliam                                                      | 1994 | Artículo científico |
| Land use impact on water quality: Valuing forest services in terms of the water supply sector                                                            | Fiquepron, J., Garcia, S., Stenger, A.                                                           | 2013 | Artículo científico |
| Land-use change versus natural controls on stream water chemistry in the Subandean Amazon, Peru                                                          | L. Lindell, M. Åström, T. Öberg                                                                  | 2010 | Artículo científico |
| IPWM: an interval parameter water quality management model                                                                                               | G. H. HUANG                                                                                      | 1996 | Artículo científico |
| Water quality characteristics of a high altitude oligotrophic Mexican lake                                                                               | Chacon-Torres, A., Rosas-Monge, C.                                                               | 1998 | Artículo científico |
| People, pollution and pathogens – Global change impacts in mountain freshwater ecosystems                                                                | Schmeller, D.S., Loyau, A., Bao, K., (...), Teisserenc, R., Vredenburg, V.T.                     | 2018 | Artículo científico |
| Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural catchments                                                              | Oliver Buck*, Dev K. Niyogi, Colin R. Townsend                                                   | 2004 | Artículo científico |
| Ecology of a high Andean stream, Rio Itambi, Otavalo, Ecuador                                                                                            | Burneo, P.C., Gunkel, G.                                                                         | 2003 | Artículo científico |
| Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology                              | George Zalidis, Stamatis Stamatiadis, Vasilios Takavakoglou, Kent Eskridge, Nikolaos Misopolinos | 2002 | Artículo científico |
| Advances in the application of the SWAT model for water resources management                                                                             | R. Jayakrishnan, R. Srinivasan, C. Santhi and J. G. Arnold                                       | 2005 | Artículo científico |
| Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity         | Antje Ullrich *, Martin Volk                                                                     | 2009 | Artículo científico |
| Hydrodynamic modelling of recreational water quality using Escherichia coli as an indicator of microbial contamination                                   | Eregno, F.E., Tryland, I., Tjomsland, T., Kempa, M., Heistad, A.                                 | 2018 | Artículo científico |
| Modelling the impact of future socio-economic and climate change scenarios on river microbial water quality                                              | Islam, M.M.M., Iqbal, M.S., Leemans, R., Hofstra, N.                                             | 2018 | Artículo científico |
| Using SWAT to enhance watershed-based plans to meet numeric water quality standards                                                                      | Mittelstet, A.R., Storm, D.E., White, M.J.                                                       | 2016 | Artículo científico |
| An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation              | Fan, C., Ko, C.-H., Wang, W.-S.                                                                  | 2009 | Artículo científico |
| Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration                                                                       | Ng, A.W.M., Perera, B.J.C.                                                                       | 2003 | Artículo científico |
| Impact of potato cultivation and cattle farming on physicochemical parameters and enzymatic activities of Neotropical high Andean Páramo ecosystem soils | Avellaneda-Torres, L.M., León Sicard, T.E., Torres Rojas, E.                                     | 2018 | Artículo científico |

|                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                |      |                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------|
| Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China                                                                                                                                       | Zhaoshi Wu □, Xiaolong Wang, Yuwei Chen, Yongjiu Cai □, Jiancai Deng                                                           | 2018 | Artículo científico               |
| Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone                                                                                          | Kaline de Melloa, □, Roberta Avena Valenteb, Timothy O. Randhirc, André Cordeiro Alves dos Santosd, Carlos Alberto Vettorazzia | 2017 | Artículo científico               |
| Modelacion de corrientes hidricas superficiales en el departamento del Quindio Colombia                                                                                                                                  | Lozano,G.; Zapata,M.A y Peña, L.E.                                                                                             | 2004 | Artículo científico               |
| Selección del modelo de simulacion de calidad del agua en el proyecto "Modelacion de corrientes hidricas superficiales en el departamento del Quindio Colombia                                                           | Lozano,G.; Zapata,M.A y Peña, L.E.                                                                                             | 2003 | Artículo científico               |
| Aplicación tecnica de optimizacion mediante algortimos geneticos para calibracion de modelo QUAL2K como una aproximacion a la modelacion de la calidad del agua de los principales rios de la zona urbana de Bogotá D.C. | Jaime Andres Lara                                                                                                              | 2007 | Trabajo de maestría - U Javeriana |

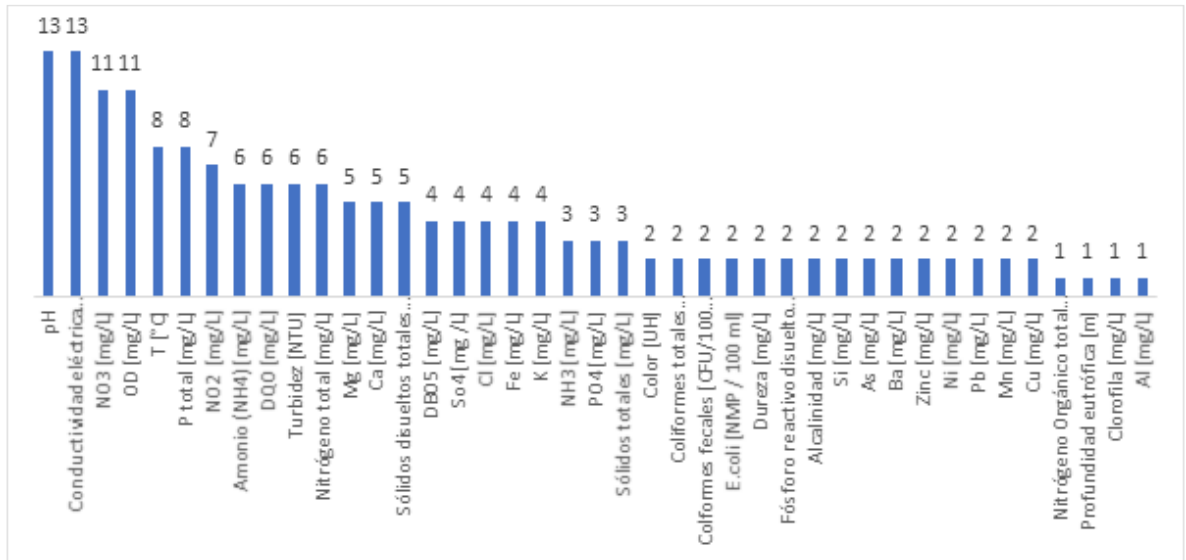
## Anexo C. Proceso de revisión



## Anexo D. Frecuencia de los parámetros estudiados discretizando la temporada de estudio

| PARÁMETROS                             | HUMEDO       |             |        |        | SECO         |             |        |        | ESTÁNDAR     |             |
|----------------------------------------|--------------|-------------|--------|--------|--------------|-------------|--------|--------|--------------|-------------|
|                                        | AGUAS ARRIBA | AGUAS ABAJO | MÁXIMO | MÍNIMO | AGUAS ARRIBA | AGUAS ABAJO | MÁXIMO | MÍNIMO | AGUAS ARRIBA | AGUAS ABAJO |
| Nitratos [mg/L]                        | 3            | 3           | 2      | 2      | 3            | 3           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Nitritos [mg/L]                        | 1            | 1           | 2      | 2      | 1            | 1           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Amoníaco [mg/L]                        | 0            | 0           | 2      | 2      | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Bicarbonato [mg/L]                     | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Nitrógeno Orgánico total [mg/L]        | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Nitrógeno disuelto total [mg/L]        | 1            | 1           | 0      | 0      | 1            | 1           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Nitrógeno total [mg/L]                 | 1            | 1           | 1      | 1      | 1            | 1           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Amonio [mg/L]                          | 1            | 1           | 1      | 1      | 1            | 1           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Color [UH]                             | 2            | 2           | 3      | 3      | 2            | 2           | 2      | 2      | 0            | 0           |
| Temperatura [°C]                       | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Profundidad eutrófica [m]              | 0            | 0           | 0      | 0      | 1            | 1           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Coliformes totales [CFU/100 ml]        | 1            | 1           | 0      | 0      | 1            | 1           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Coliformes fecales [CFU/100 ml]        | 0            | 0           | 0      | 0      | 1            | 1           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| <i>Escherichia coli</i> [NMP / 100 ml] | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Dureza [mg/L]                          | 2            | 2           | 0      | 0      | 2            | 2           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Demanda bioquímica de Oxígeno [mg/L]   | 3            | 3           | 1      | 1      | 3            | 3           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Demanda química de Oxígeno [mg/L]      | 0            | 2           | 2      | 2      | 2            | 2           | 2      | 2      | 0            | 0           |
| Fósforo total [mg/L]                   | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Clorofila [mg/L]                       | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Fosfato [mg/L]                         | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Fósforo reactivo disuelto [µg/L]       | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Sólidos disueltos totales [mg/L]       | 1            | 1           | 1      | 1      | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Sólidos suspendidos totales [mg/L]     | 2            | 2           | 2      | 2      | 1            | 1           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Sólidos totales [mg/L]                 | 1            | 1           | 0      | 0      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Turbidez [NTU]                         | 0            | 0           | 3      | 3      | 0            | 0           | 2      | 2      | 0            | 0           |
| pH                                     | 4            | 4           | 4      | 4      | 4            | 4           | 3      | 3      | 0            | 0           |
| Conductividad eléctrica [µS/cm]        | 4            | 4           | 3      | 3      | 4            | 4           | 3      | 3      | 1            | 1           |
| Oxígeno disuelto [mg/L]                | 3            | 3           | 4      | 4      | 3            | 3           | 3      | 3      | 0            | 0           |
| Alcalinidad [mg/L]                     | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Sulfato [mg /L]                        | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Cloro [mg/L]                           | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Silicio [mg/L]                         | 1            | 1           | 1      | 1      | 1            | 1           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Hierro [mg/L]                          | 1            | 1           | 1      | 1      | 1            | 1           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Arsénico [mg/L]                        | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Bario [mg/L]                           | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Zinc [mg/L]                            | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Níquel [mg/L]                          | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Plomo [mg/L]                           | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Manganeso [mg/L]                       | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Sodio [mg/L]                           | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Potasio [mg/L]                         | 0            | 0           | 2      | 1      | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Cobre [mg/L]                           | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |
| Magnesio [mg/L]                        | 0            | 0           | 2      | 2      | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Calcio [mg/L]                          | 0            | 0           | 2      | 2      | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           |
| Aluminio [mg/L]                        | 0            | 0           | 1      | 1      | 0            | 0           | 0      | 0      | 0            | 0           |

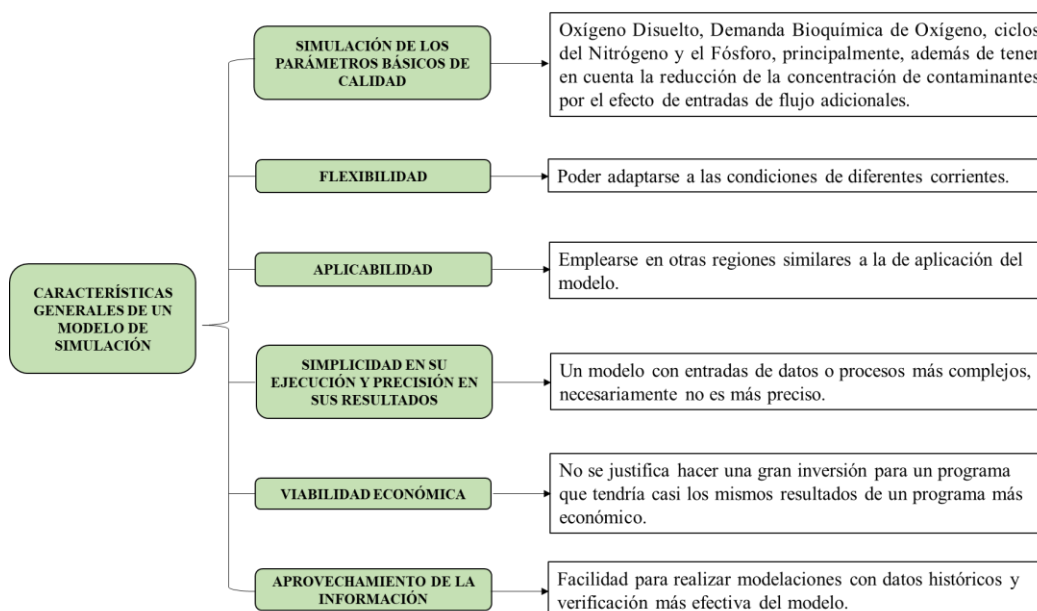
## Anexo E. Parámetros más estudiados



## Anexo F. Valores máximos y mínimos de los parámetros encontrados

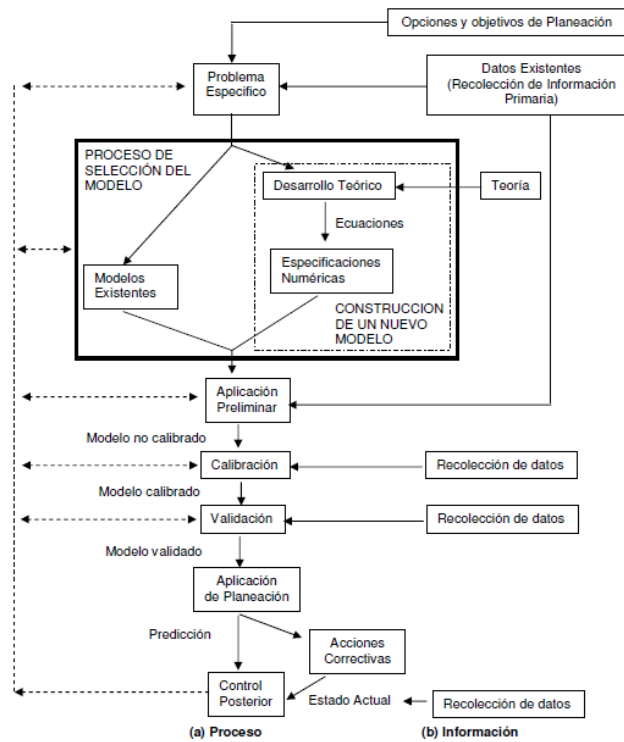
| PARÁMETROS                             | MÁXIMOS      |             |              |             |              |             | MÍNIMOS      |             |              |             |              |             |
|----------------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|                                        | HUMEDO       |             | SECO         |             | ESTÁNDAR     |             | HUMEDO       |             | SECO         |             | ESTÁNDAR     |             |
|                                        | AGUAS ARRIBA | AGUAS ABAJO | AGUAS ARRIBA | AGUAS ABAJO | AGUAS ARRIBA | AGUAS ABAJO | AGUAS ARRIBA | AGUAS ABAJO | AGUAS ARRIBA | AGUAS ABAJO | AGUAS ARRIBA | AGUAS ABAJO |
|                                        | ARRIBA       | ABAJO       | ARRIBA       | ABAJO       | ARRIBA       | ABAJO       | ARRIBA       | ABAJO       | ARRIBA       | ABAJO       | ARRIBA       | ABAJO       |
| Nitratos [mg/L]                        | 125          | 8           | 60           | 9           | —            | —           | 0,886        | 1,329       | —            | 1,329       | —            | —           |
| Nitritos [mg/L]                        | 0,032        | 0,005       | 0,001        | 0,002       | —            | —           | 0,032        | 0,005       | 0,001        | 0,002       | —            | —           |
| Bicarbonato [mg/L]                     | —            | —           | —            | —           | —            | 63,8        | —            | —           | —            | —           | —            | 63,8        |
| Nitrógeno Orgánico total [mg/L]        | —            | —           | —            | —           | —            | 0,158       | —            | —           | —            | —           | —            | 0,158       |
| Nitrógeno total [mg/L]                 | 1            | 1,54        | 1,1          | 3,06        | —            | —           | 1            | 1,54        | 1,1          | 3,06        | —            | —           |
| Amonio [mg/L]                          | 0,129        | 0,387       | 0,129        | 0,387       | —            | —           | 0,129        | 0,387       | 0,129        | 0,387       | —            | —           |
| Color [UH]                             | 18           | 18          | 15           | 40          | —            | —           | 18           | 18          | 15           | 40          | —            | —           |
| Temperatura [°C]                       | 13,6         | 23,1        | 17,5         | 22,2        | —            | —           | 7,5          | 12,3        | 7            | 13,1        | —            | —           |
| Profundidad eutrófica [m]              | —            | —           | —            | —           | —            | 15          | —            | —           | —            | —           | —            | 15          |
| Coliformes totales [CFU/100 ml]        | —            | —           | 1000         | 12          | —            | —           | —            | —           | 1000         | 12          | —            | —           |
| Coliformes fecales [CFU/100 ml]        | —            | 3000        | 4            | 10000       | —            | —           | —            | 3000        | <4           | 10000       | —            | —           |
| <i>Escherichia coli</i> [NMP / 100 ml] | —            | —           | 500          | 10          | —            | —           | —            | —           | 500          | 10          | —            | —           |
| Dureza [mg/L]                          | —            | —           | —            | —           | —            | 24,18       | —            | —           | —            | —           | —            | 24,18       |
| Demanda bioquímica de Oxígeno [mg/L]   | 3            | 4           | 14           | 25          | —            | —           | 0,5          | 1           | 1,5          | 1,8         | —            | —           |
| Demanda química de Oxígeno [mg/L]      | 68           | 120         | 21,2         | 61          | —            | —           | 3,2          | 13          | 10           | 5           | —            | —           |
| Fósforo total [mg/L]                   | 0,23         | 0,74        | 0,3          | 1,56        | —            | —           | 0,23         | 0,74        | 0,3          | 1,56        | —            | —           |
| Clorofila [mg/L]                       | —            | —           | —            | —           | —            | 3,77        | —            | —           | —            | —           | —            | 3,77        |
| Fósforo reactivo disuelto [µg/L]       | —            | —           | —            | —           | —            | 5,39        | —            | —           | —            | —           | —            | 5,39        |
| Sólidos disueltos totales [mg/L]       | 200          | 40          | —            | —           | —            | —           | 200          | 40          | —            | —           | —            | —           |
| Sólidos suspendidos totales [mg/L]     | 36           | 58          | 36           | 40          | —            | —           | 10           | 42          | 36           | 40          | —            | —           |
| Sólidos totales [mg/L]                 | 220          | 100         | —            | —           | —            | —           | 220          | 100         | —            | —           | —            | —           |
| Turbidez [NTU]                         | —            | —           | —            | —           | —            | 147,47      | —            | —           | —            | —           | 5,6          | —           |
| pH                                     | 8,4          | 8,1         | 8,1          | 8,12        | —            | —           | 7,25         | 6           | 6            | 6,7         | —            | —           |
| Conductividad eléctrica [µ S/cm]       | 390          | 350         | 330          | 300         | 205          | 1           | 25,1         | 40          | 22,9         | 52          | 205          | 273         |
| Oxígeno disuelto [mg/L]                | 8            | 7,7         | 9,5          | 8           | —            | —           | 6,5          | 5,5         | 6,2          | 4,5         | —            | —           |
| Alcalinidad [mg/L]                     | —            | —           | —            | —           | —            | 70          | —            | —           | —            | —           | —            | 70          |
| Silicio [mg/L]                         | 55,3         | 39,8        | 75,9         | 61,3        | —            | —           | 55,3         | 39,8        | 75,9         | 61,3        | —            | —           |
| Hierro [mg/L]                          | 0,2          | 0,05        | 1,4          | 0,25        | —            | —           | 0,2          | 0,05        | 1,4          | 0,25        | —            | —           |
| Sodio [mg/L]                           | —            | —           | —            | —           | —            | 2,38        | —            | —           | —            | —           | —            | 2,38        |
| Potasio [mg/L]                         | —            | —           | —            | —           | —            | 1,84        | —            | —           | —            | —           | —            | 1,84        |
| Magnesio [mg/L]                        | —            | —           | —            | —           | —            | 4,8         | —            | —           | —            | —           | —            | 4,8         |
| Calcio [mg/L]                          | —            | —           | —            | —           | —            | 1,77        | —            | —           | —            | —           | —            | 1,77        |

## Anexo G. Características generales de un modelo de simulación



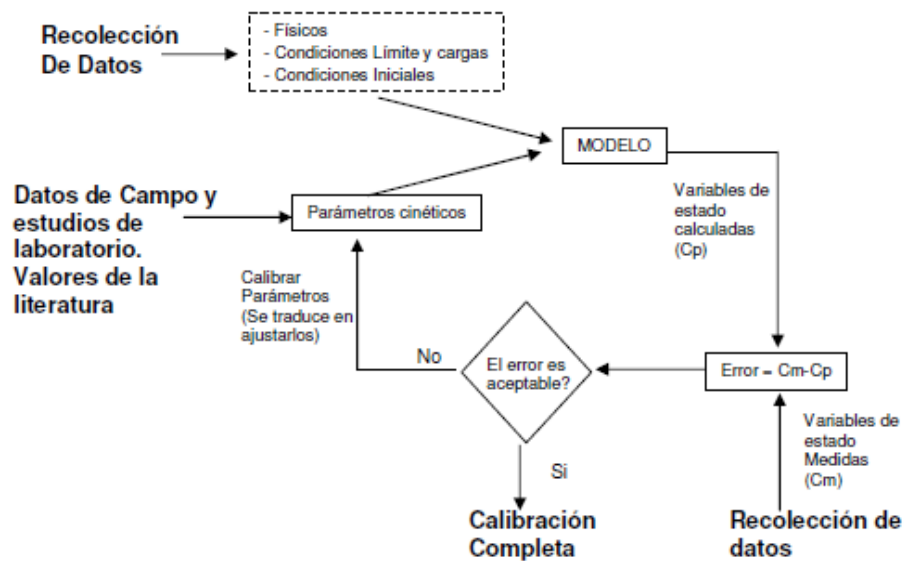
Fuente. Lozano G. et al., 2003

## Anexo H. Proceso de simulación de una corriente hídrica superficial



Fuente. Adaptado de Chapra. Surface Water Quality Modeling. Pág. 319

## Anexo I. Diagrama del proceso de calibración del modelo



Fuente. Adaptado de Chapra. Surface Water Quality Modeling