

**DESARROLLO DE UN MODELO DE PLANIFICACIÓN AMBIENTAL PARA LA CALIDAD DE LOS RECURSOS  
HÍDRICOS SUPERFICIALES CONSIDERANDO SU VARIABILIDAD CLIMÁTICA ESTACIONAL MEDIANTE  
IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL**

**JUAN PABLO RODRÍGUEZ MIRANDA**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ENFÁSIS EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN Y EL CONOCIMIENTO  
BOGOTÁ D.C.  
2017**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE PLANIFICACIÓN AMBIENTAL PARA LA CALIDAD DE LOS RECURSOS  
HÍDRICOS SUPERFICIALES CONSIDERANDO SU VARIABILIDAD CLIMÁTICA ESTACIONAL MEDIANTE  
IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL**

**JUAN PABLO RODRÍGUEZ MIRANDA**

**Tesis de grado para optar por el título de Doctor en Ingeniería**

**Director  
CESAR AUGUSTO GARCIA UBAQUE, Ph D.**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ENFÁSIS EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN Y EL CONOCIMIENTO  
BOGOTÁ D.C.  
2017**

## ***Comisión de Doctorado***

Esta tesis titulada “Desarrollo de un modelo de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad estacional mediante implementación computacional”, escrita por Juan Pablo Rodríguez Miranda, ha sido aprobada en cuanto a estilo y contenido intelectual.

Hemos leído esta tesis y la aprobamos,

---

**Doctora Martha Isabel Cobo Ángel**  
**JURADO 1.**

---

**Doctor Álvaro Suazo Schwencke**  
**JURADO 2.**

---

**Doctor Sandro Javier Bolaños Castro**  
**JURADO 3.**

---

**Doctor Cesar Augusto García Ubaque**  
**DIRECTOR**

**Fecha de la defensa**  
**Diciembre de 2017.**

## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS**

*Agradecimientos:*

*Siempre a Dios, que es omnipotente y omnisciente, y que le entrega la sabiduría y la inteligencia a los seres humanos.*

*Dios le enseñó todas las artes y oficios para vivir y disfrutar el mundo con la ciencia del hombre. Dios da la naturaleza al hombre para transformarla toda. Dios es el primer maestro, arquitecto e ingeniero de todo.*

*Dra. María Luisa Piraquive. Diciembre 12 de 2013.*

*A mi Esposa Astrid, mi hija Mariana y los bebés que están pronto por nacer, por el apoyo incondicional en este proceso intelectual.*

*A mis papás (Santiago y Colombia), por la ayuda y fortaleza en esta nueva meta.*

*A Gina y Ariana Sofía, por estar ahí apoyando.*

*Al doctor Cesar García Ubaque por su guía, orientación y colaboración en este proceso de construcción de este manuscrito mediante la dirección.*

*Al doctor Giovanni Tarazona Bermúdez por su gestión, colaboración y aportes.*

*Al doctor Gustavo Vergel Cabrales por su orientación metodológica; al doctor Juan Manuel Sánchez Céspedes por su orientación específica y aportes valiosos; a los doctores Álvaro Suazo Schwencke, Mauricio Ruíz Ochoa y Virgilio Miniño Mejía por su orientación científica; al doctor Sandro Javier Bolaños Castro por las recomendaciones desde lo científico para enriquecer y mejorar la investigación; al doctor Manfred Schütze por sus valiosos comentarios y aporte científico.*

*Agradezco a todos, por este logro, que se convierte en una promesa especial para un futuro prometedor.*

## RESUMEN

El presente manuscrito de tesis doctoral, "Desarrollo de un modelo de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad climática estacional mediante implementación computacional", en un marco meta cognitivo y en el contexto de la línea de investigación Ciencia y tecnología de la información y conocimiento, establece un modelo de planificación ambiental para las cuencas hidrográficas (cuerpos de agua superficiales). Se mencionan los elementos teóricos de la revisión exhaustiva de la literatura especializada en términos de la conceptualización de la planificación ambiental y biocomplejidad en los recursos hídricos y su escasa integración con la variabilidad climática estacional, los recursos informáticos disponibles como soluciones específicas de hidrología, hidráulica o calidad del agua, pero no integradas entre sí y la escasa aplicación de la ingeniería de sistemas complejos mediante técnicas computacionales en la toma de decisiones en cuencas hidrográficas. En la metodología se mencionan los aspectos para el desarrollo de la tesis doctoral en términos de la estructura metodológica desarrollada, método y diseño de investigación analítico – cuasi experimental con enfoque concurrente, con muestras trimestrales de información secundaria de precipitación y calidad del agua de la cuenca hidrográfica analizada y a su vez realizando la normalización de las variables del modelo para construir un modelo analítico mediante el análisis estadístico de los datos y una identificación del sistema, para posteriormente aplicar la técnica computacional de inteligencia artificial. En los resultados, se expone el desarrollo de la metodología propuesta en términos de análisis de los costos de inversión (para todos los activados, reactores anaerobios y lagunas de oxidación) y selección de tecnologías de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en Cundinamarca (función ponderada de agregación de producto); la ingeniería del software como un vehículo para la planificación ambiental en la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional; normalización de las variables de calidad del agua (método maximizar y minimizar) y precipitación para la planificación ambiental en la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional; vector de calidad ambiental; el método Delphi y modelo analítico para la planificación ambiental de la calidad de los recursos hídricos superficiales; análisis de correlaciones entre variables de calidad del agua y precipitación (correlaciones del 0.24 entre precipitación y  $DBO_5$ , 0.20 entre precipitación y  $N-NO_2$ , 0.010 entre SST y  $P_{total}$ ); identificación del modelo matemático que representa la cuenca hidrográfica (transformada de Laplace) y técnicas de inteligencia artificial para emular la calidad ambiental (minería de datos y red neuronal artificial, algoritmo Levenberg Marquardt con error cuadrático medio de  $4.72 \times 10^{-5}$  y coeficiente de determinación de prueba de 0.99188). Este documento de tesis, de manera enfática considera los aportes específicos al conocimiento en términos de: Ecuaciones econométricas de costos de inversión para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con las variables caudal,  $DBO_5$ , SST, N y P; Metodología para la selección de tecnologías con expresión ponderada de agregación de producto o de promedio geométrico ponderado; Normalización de variables  $DBO_5$ ,  $N-NO_2$ , SST,  $P_{Total}$  y Precipitación mediante el método de maximizar y minimizar variables; Integrar la variable precipitación con las variables de calidad del agua  $DBO_5$ ,  $N-NO_2$ , SST y  $P_{Total}$  en un modelo estadístico, matemático y analítico; Aplicación de técnicas de inteligencia artificial para emular el criterio del grupo de expertos en términos de la calidad ambiental mediante Minería de Datos, Lógica Difusa, Red Neuronal Artificial y Enjambres de partículas; Modelo de planificación ambiental considerando la variabilidad climática estacional para cuerpos de agua superficiales utilizando minería de datos y red neuronal artificial (algoritmo Levenberg Marquardt).

## ABSTRACT

The present doctoral thesis manuscript, "Development of an environmental planning model for the surface water resources quality considering their seasonal climatic variability through computational implementation", within a cognitive framework and in the context of information and knowledge Science and technology line research, establishes an environmental planning model for watersheds (surface water bodies). The theoretical elements of the exhaustive review of the specialized literature are mentioned in terms of the conceptualization of environmental planning and biocomplexity in water resources and their low integration with seasonal climatic variability, the available computer resources as hydrology, hydraulic or water quality as specific solutions, but

not integrated with each other and the scarce application of complex systems engineering through computational techniques in making decision in watersheds. In the methodology mentioned aspects for the development of the doctoral thesis in terms of the methodological structure developed, method and design of quasi experimental - analytical research with concurrent approach, with quarterly samples of secondary information of precipitation and water quality of the hydrographic basin analyzed and in turn performing the normalization of the model variables to construct an analytical model by means of the statistical analysis of the data and a system identification, to later apply the computational technique of artificial intelligence. The results show the development of the proposed methodology in terms of analysis of investment costs (for activated sludge, anaerobic reactors and oxidation ponds) and selection of technologies for municipal wastewater treatment plants in Cundinamarca (weighted function aggregation of product); software engineering as a vehicle for environmental planning in the quality of surface water resources considering seasonal climatic variability; normalization of water quality variables (maximize and minimize method) and precipitation for environmental planning in the quality of surface water resources considering seasonal climatic variability; environmental quality vector; the Delphi method and analytical model for the environmental planning of the quality of surface water resources; correlation analyzes between water quality and precipitation variables (correlations of 0.24 between precipitation and BOD, 0.20 between precipitation and N-NO<sub>2</sub>, 0.010 between SST and P<sub>total</sub>); identification of the mathematical model that represents the watershed (Laplace transform) and artificial intelligence techniques to emulate the environmental quality (data mining and artificial neural network, Levenberg Marquardt algorithm with mean square error of  $4.72 \times 10^{-5}$  and coefficient of determination of test of 0.99188). This thesis document emphatically considers the specific contributions to knowledge in terms of: Econometric equations of investment costs for municipal wastewater treatment plants with the variables flow, BOD, SST, N and P<sub>Total</sub>; Methodology for the selection of technologies with weighted expression of product aggregation or weighted geometric average; Normalization of variables BOD, N-NO<sub>2</sub>, SST, P<sub>Total</sub> and Precipitation by the method of maximizing and minimizing variables; Integrate the precipitation variable with the water quality variables BOD, N-NO<sub>2</sub>, SST and P<sub>Total</sub> in a statistical, mathematical and analytical model; application of artificial intelligence techniques to emulate the criteria of the group of experts in terms of environmental quality through Data Mining, Fuzzy Logic, Artificial Neural Network and Particle Swarms; Environmental planning model considering the seasonal climatic variability for surface water bodies using data mining and artificial neural network (Levenberg Marquardt algorithm).

**PALABRAS CLAVE:**

Planificación ambiental, cuenca hidrográfica, inteligencia artificial, variabilidad climática.

**KEYWORDS:**

Environmental planning, hydrographic basin, artificial intelligence, climatic variability.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 CONTENIDO DEL DOCUMENTO. ....</b>	<b>18</b>
<b>2 CAPITULO I. Estado del Arte .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.1 Planificación Ambiental en los Recursos Hídricos. ....	¡Error! Marcador no definido.
2.2 Integración de la variabilidad climática estacional y la gestión del recurso hídrico. ¡Error! Marcador no definido.	
2.3 Biocomplejidad en las cuencas hidrográficas.....	¡Error! Marcador no definido.
2.4 Modelado en términos ambientales .....	¡Error! Marcador no definido.
2.5 Tipos de métodos para el modelado .....	¡Error! Marcador no definido.
2.6 Recursos Informáticos disponibles .....	¡Error! Marcador no definido.
2.7 Gestión integrada de los recursos hídricos y software. ....	¡Error! Marcador no definido.
2.8 Transformada de Laplace .....	¡Error! Marcador no definido.
2.9 Conceptualización de la Ingeniería Bio-Inspirada e Ingeniería de Sistemas Complejos .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>3 CAPITULO II. Metodología .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.1 Método .....	¡Error! Marcador no definido.
3.2 Muestra .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3 Hipótesis.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4 Alcance.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5 Metodología propuesta.....	¡Error! Marcador no definido.
<b>4 CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.1 Analizar los factores de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que influyen en el comportamiento de la estructura ambiental en una cuenca hidrográfica. ..	¡Error! Marcador no definido.
4.1.2 Ecuaciones econométricas para las plantas de tratamiento de aguas residuales en el Departamento de Cundinamarca (Colombia). ....	¡Error! Marcador no definido.
4.1.3 Ecuaciones econométricas de costos de inversión por tipos de tecnología de tratamiento de aguas residuales municipales. ....	¡Error! Marcador no definido.
4.1.4 Metodología de selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. ....	¡Error! Marcador no definido.

- 4.1.5 Composición típica de las aguas residuales municipales .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.1.6 Eficiencias de remoción de contaminantes por tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.1.7 Calidad requerida en el agua residual tratada .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.1.8 Aspectos de la localización de PTARM .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.2 Normalización de las variables de calidad del agua y precipitación para la planificación ambiental en la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional. **¡Error! Marcador no definido.**
- 4.2.1 Vector de calidad ambiental.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.3 Integración de la variabilidad climática estacional en el proceso de planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.3.1 La ingeniería del software como un vehículo para la planificación ambiental en la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional. ..**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.3.2 Variables de calidad ambiental (dependiente), precipitación y calidad del agua representada mediante modelo analítico.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.3.3 Análisis de correlaciones entre variables de calidad del agua y precipitación..... **¡Error! Marcador no definido.**
- 4.3.3.1 Análisis estadístico de correlación de variables .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.3.3.2 Análisis de correlación y dispersión de variables independientes de calidad del agua y precipitación. **¡Error! Marcador no definido.**
- 4.3.3.3 Análisis de estadístico de variables normalizadas de calidad del agua y precipitación. **¡Error! Marcador no definido.**
- 4.4 Modelo y/o estructura que permita una representación de la planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional mediante una implementación computacional.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.4.1 Modelo para la cuenca hidrográfica del Río Bogotá. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.4.2 Identificación del modelo matemático que representa la cuenca hidrográfica. .... **¡Error! Marcador no definido.**
- 4.4.3 Técnicas de inteligencia artificial para emular la calidad ambiental.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.4.3.1 Técnicas para comprender la estructura ambiental hídrica de la cuenca hidrográfica basada en la información empírica disponible.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.4.3.1.1 Minería de Datos. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.4.3.2 Técnicas para emular la calidad ambiental en el cuerpo de agua superficial. .... **¡Error! Marcador no definido.**
- 4.4.3.2.1 Lógica Difusa .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 4.4.3.2.2 Red Neuronal Artificial .....**¡Error! Marcador no definido.**

4.4.3.2.3	Enjambre de partículas.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.4.4	Resultados Finales de calidad ambiental utilizando las técnicas de inteligencia artificial.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.5	Impacto derivado del trabajo de investigación.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>6</b>	<b>REFLEXIONES FINALES, LINEAS DE TRABAJO Y DESARROLLOS FUTUROS.</b> .....	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS.</b> .....	<b>25</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Recursos informáticos disponibles en los recursos hídricos.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 2.	Gestión integrada de recursos hídricos. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 3.	Medidas de desempeño de diferentes técnicas computacionales. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 4.	Aplicaciones de las diferentes técnicas computacionales. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 5.	Valoración de la calidad ambiental.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 6.	Ecuaciones de costos. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 7.	Ecuaciones de costos para Colombia.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 8.	Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con tecnología anaerobia. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 9.	Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con tecnología lodos activados. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 10.	Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con tecnología lagunas de oxidación. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 11.	Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con tecnología lagunas aireadas. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 12.	Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con tecnología avanzado DAF. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 13.	Análisis econométrico por modelo lineal. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 14.	Análisis econométrico por modelo lineal. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 15.	Análisis econométrico por modelo Log – Log.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 16.	Análisis econométrico por modelo Log – Log.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

- Tabla 17. Análisis econométrico por modelo Log – Log. Tecnología Lodos activados ..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 18. Análisis econométrico por modelo Log – Log. Tecnología Reactor Anaeróbico..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 19. Análisis econométrico por modelo Log – Log. Tecnología Lagunas de oxidación. ... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 20. Descriptores y cualificación por parámetro.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 21. Matriz de evaluación por tecnología de tratamiento de aguas residuales**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 22. Composición típica de las aguas residuales municipales crudas. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 23. Eficiencias de remoción de contaminantes por tecnologías. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 24. Criterios de calidad del agua residual tratada .....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 25. Rango de trabajo de las variables. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 26. Resumen de métodos normalizados aplicados a la calidad ambiental. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 27. Análisis estadístico de variables.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 28. Resultados de Funciones de Probabilidad Acumuladas Para Cada Variable Independiente .....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 29. Resultados desempeño de la Red Neuronal Artificial con varios algoritmos analizados .....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 30. Resultados finales de las técnicas de inteligencia artificial. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 31. Resultados de los impactos del trabajo de investigación. ....**¡Error! Marcador no definido.**

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Estructura metodológica de la tesis doctoral. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 2. Modelo analítico de la tesis doctoral. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 3. Diagrama de Bloques Modelo ARX.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 4. Esquema del algoritmo desarrollado para minería de datos. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 5. Funciones difusa establecidas. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 6. Importación de los Datos en el tiempo a Matlab. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 7. Modelo de Red Neuronal Feedforward Propuesto. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 8. Red Neuronal Implementada en Matlab. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 9. Calidad ambiental período año 2010 en la cuenca hidrográfica del Río Bogotá..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 10. Calidad ambiental período año 2008 - 2015 en la cuenca hidrográfica del Río Bogotá. ....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 11. Calidad ambiental período año 2014 en la cuenca hidrográfica del Río Bogotá..... **¡Error! Marcador no definido.**

## LISTA DE GRAFICOS

- Gráfico 1. Costo de inversión y caudal de diseño.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 2. Costo de inversión estimado y caudal de diseño.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 3. Calidad Ambiental normalizada para el parámetro DBO<sub>5</sub> .....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 4. Calidad Ambiental normalizada para el parámetro N –NO<sub>2</sub>. .....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 5. Calidad Ambiental normalizada para el parámetro SST. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 6. Calidad Ambiental normalizada para el parámetro P<sub>TOTAL</sub>. .....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 7. Calidad Ambiental normalizada para el parámetro Precipitación (P). .....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 8. Dispersión entre DBO<sub>5</sub> y Precipitación.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 9. Dispersión entre N-NO<sub>2</sub> y Precipitación.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 10. Dispersión entre SST y Precipitación .....**¡Error! Marcador no definido.**

Gráfico 11. Dispersión entre $P_{TOTAL}$ y Precipitación. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 12. Dispersión entre $P_{TOTAL}$ y SST.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 13. Histograma y Normalizada para $DBO_5$ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 14. Histograma y Normalizada para $N-NO_2$ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 15. Histograma y Normalizada para SST .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfica 16. Histograma y Normalizada para P-total .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfica 17. Histograma y Normalizada para Precipitación.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 18. Función de Probabilidad Discreta para $DBO_5$ (Ajuste Normal).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 19. Función de Probabilidad Discreta para $DBO_5$ (Ajuste Logístico).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 20. Función de Probabilidad Discreta para $N-NO_2$ (Ajuste Normal) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 21. Función de Probabilidad Discreta para $N-NO_2$ (Ajuste Logístico) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 22. Función de Probabilidad Discreta para SST (Ajuste Normal).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfica 23. Función de Probabilidad Discreta para SST (Ajuste Logístico) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 24. Función de Probabilidad Discreta para $P_{total}$ (Ajuste Normal).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 25. Función de Probabilidad Discreta para $P_{total}$ (Ajuste Logístico).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 26. Comportamiento de todas las variables en el Dominio del Tiempo.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 27. Identificación del sistema a partir de modelos de tiempo continuo.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 28. Respuesta a Entrada Paso para $DBO_5$ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 29. Respuesta a Entrada Paso para $N-NO_2$ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 30. Respuesta a Entrada Paso para $P_{total}$ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 31. Respuesta a Entrada Paso para SST .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 32. Identificación del Sistema a Partir de Modelo Discreto ARX.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 33. Comportamiento de cajas para la $DBO_5$ . ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 34. Diagrama tridimensional para la $DBO_5$ . ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 35. Diagrama de cajas para la SST.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 36. Diagrama tridimensional para la SST. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 37. Diagrama para la $P_{Total}$ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 38. Diagrama tridimensional para $P_{Total}$ . ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 39. Diagrama tridimensional para $N-NO_2$ . ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 40. Diagrama para $N-NO_2$ . ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 41. Diagrama tridimensional para precipitación. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 42. Diagrama para Precipitación.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfico 43. Vista Superficial Entre Calidad Ambiental, $N-NO_2$ y $DBO_5$ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

- Gráfico 44. Comparativa entre CA Calculada Vs CA Medida. ....**¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 45. Regresión Lineal Cálculo de Calidad Ambiental. (Algoritmo Levenberg-Marquardt) **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 46. Comparativa entre CA Calculada Vs CA Medida. (Algoritmo Levenberg-Marquardt) **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 47. Regresión Lineal Cálculo de Calidad Ambiental. (Enjambre de partículas) ..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 48. Comparativa entre CA Calculada Vs CA Medida (Enjambre de particular)..... **¡Error! Marcador no definido.**

## 1. INTRODUCCIÓN.

Para el ordenamiento de un territorio, la inclusión de la variable ambiental representa garantizar en el tiempo la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables y no renovables, así como de los servicios ambientales disponibles en el mismo y por ello, el tener una política ambiental se establece como un vector de sostenibilidad ambiental del territorio y dentro de ésta, la planificación ambiental coadyuva a las estrategias mismas del ordenamiento de un sistema deseado, lógico y flexible, es decir, un instrumento para orientar acciones y criterios en materia del manejo o del uso sostenible del territorio y de construcción de espacios, sujetos y territorios de manera simultánea (Vega L. , 2002; Wernes, 1995). En ese sentido, la planificación en el orden de la dimensión ambiental, plantea un conocimiento cualitativo y cuantitativo de la composición misma del ecosistema y una racionalidad, así como el uso eficiente de los recursos, en términos de las potencialidades, limitaciones y característica del medio como base del funcionamiento del sistema natural (Wernes, 1995), con lo cual se pueden tomar decisiones en forma colectiva de actores vinculantes sobre el ambiente para que no ocurran daños injustificables y exista un desarrollo sustentable global del territorio, en un marco referencial que establece lineamientos y medidas concretas de intervención (Leitmann J. , 1999; Millar D. , 2005; Sheila S. , 2004; Rivas, 2002).

La planificación ambiental se configura como un proceso sincrónico y organizado de toma de decisiones en un espacio geográfico delimitado, que posee y procesa un conocimiento específico y significativo del territorio en los activos ambientales, los cuales son reales, dinámicos y cambiantes y que ordenados y organizados, confluyen en dirección sistémica a la visión integral del objeto planificado. Sin embargo, el momento de la planificación y en especial de la dimensión ambiental territorial, es cuando se necesita transformar la información del conocimiento empírico ambiental del territorio, es decir, cuando el sistema es complejo y cambiante en el tiempo, por ello, la formulación para la toma de decisión se hace necesaria para delimitar los actores (no toman decisiones porque recibe y entrega información) y agentes (toman decisiones dado que es cognitivo), se plantea objetivos y estrategias, para preservar y/o modificar adecuadamente el ambiente (Yan, 2015; George, 2011; Hillman, 2012).

Estratégicamente, se ha realizado la planificación de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), por el conflicto en el uso del recurso para establecer un balance entre la capacidad ecológica de la oferta de bienes y servicios ambientales de los ecosistemas y la demanda de estos, así como la compatibilidad de las actividades que se realizan en el entorno de los cuerpos de agua para mitigar posibles efectos a largo plazo (Monzonís, 2015), y la importancia social de los recursos hídricos para el desarrollo económico regional (Safavi, 2015; Zhang X. , 2008; Mariño, 2001).

La planificación de la GIRH, considera a una unidad espacial de planificación hidrológica denominada Cuenca Hidrográfica (GWP, 2009), expone que debe existir una característica homogénea en lo físico, ambiental y como recurso hídrico, que busca garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico en términos del uso, control y protección de los recursos hídricos (Pilar, 2011), mediante el conocimiento de las interrelaciones entre los ecosistemas y los procesos hidrológicos de los cuales depende la oferta hídrica para cuantificar la cantidad de agua disponible para los diferentes usos, incluida el agua requerida para el mantenimiento de los ecosistemas. Esto conduce a una caracterización en: uso del agua (plan de sub-cuenca, plan local de gestión de acuíferos, plan local de asignación de agua en distritos de usuarios del agua, plan del gobierno local), implementación (plan de gestión a escala provincial o de cuenca) y políticas (procesos nacionales e internacionales para desarrollar acciones, tratados y leyes del agua). Sin embargo, de manera general la planificación del recurso hídrico es un proceso dinámico interactivo y complejo, para la prevención de conflictos entre usuarios, entre jurisdicciones, entre intereses de las sucesivas generaciones, la prevención de situaciones de emergencia hídrica relacionada con excesos o faltantes de agua, protección y promoción del buen estado de las aguas, protección de las aguas superficiales y subterráneas, búsqueda del equilibrio entre el medio y el aprovechamiento de los recursos hídricos necesarios para el desarrollo sostenible y además la prevención de procesos de contaminación y degradación ambiental que pueden ser irreversible (Schreider, 2011).

Esta planificación ha sido fragmentada y poco integradora, lo cual ha generado en algunos casos problemas de externalidades (*contaminación del cuerpo de agua, debido a que en algunos casos existen plantas de tratamiento de agua residuales municipales sin la eficiencia adecuada en la remoción de contaminantes y en otros casos sin contar con esta infraestructura para el tratamiento*) y por ende un desequilibrio ambiental en el ordenamiento sistémico de las cuencas especialmente, cuando estas son limitadas, no articulada con la dinámica ambiental y el comportamiento climático estacional, que no es suficiente para contrarrestar los efectos de la variabilidad climática estacional (IPCC, 2008), ocasionando un modelo débil de relaciones entre actores y agentes. Debido a que satisfacer las necesidades del agua de todos los usuarios (existen varios tipos de ellos) no es posible, porque aumenta el conflicto por el uso y la alteración de la calidad del agua por la variabilidad climática (IPCC., 2014), dado que es un recurso escaso y compartido (*muchas veces distribución desigual*), generando una insostenibilidad ambiental (*no centrada en la conservación del recurso y sometido a una gran presión*) y por consiguiente una insuficiente planificación y ordenamiento de las cuencas hídricas. Lo anterior tiene como consecuencia, el poco conocimiento completo del recurso hídrico superficial para gestionar en los aspectos físicos, ambientales, económicos y sociales, aunque se tenga en algunos casos información de las cuencas

hidrográficas, pero desconociendo la aleatoriedad del clima, y sumado a lo anterior, el seguimiento del cumplimiento de la legislación y normatividad es escaso. Por ello, de manera general, se encuentra una inconsistencia técnica, dado que con la aplicación de instrumentos técnicos, muchas veces se distorsiona la gestión del recurso hídrico en los cuerpos de aguas superficiales.

Los problemas identificados en el Sistema Nacional Ambiental de Colombia (SINA) se pueden sintetizar de la siguiente manera (Vega L. , 2001):

- Desarticulación y baja capacidad en la implementación de la política ambiental en todos los niveles.
- Falta de mecanismos e instrumentos para el control de gestión institucional.
- Desarticulación funcional, jurisdiccional, sectorial y ambiental.
- Asincronía en la formulación y ejecución de los planes de ordenamiento y ambientales por los distintos actores, los cuales presentan soluciones estratégicas y operativas incoherentes.
- Pérdida de la memoria institucional, entre otros.

Así mismo, existe en la planificación ambiental del recurso hídrico un desequilibrio ambiental en el ordenamiento sistémico de las cuencas hídricas, no articulado con la dinámica ambiental ni con el comportamiento estacional, ocasionando un modelo de relaciones entre actores y agentes débil, que incrementa los conflictos por el uso y altera la calidad del agua, generando una insostenibilidad ambiental, lo cual se ve agravado por la precaria y deficiente planificación y ordenamiento de las cuencas hídricas

En países cercanos al trópico, como por ejemplo Colombia, los fenómenos de variabilidad climática están influenciados por la Zona de Confluencia Inter Tropical (ZCI), y por las dinámicas de las cuencas de los ríos Amazonas, Orinoco y de los océanos Pacífico y Atlántico. Por ello, la construcción de la respuesta hidrológica es compleja y en especial para la toma de decisiones en el comportamiento de los recursos hídricos (García M. , 2012; Gutiérrez, 2010), dado que en el país, existen regímenes de precipitación y de variabilidad climática muy significativos (*desde bimodal en la región andina y modal en la región caribe*) y variable entre regiones, lo cual establece, que los fenómenos de variabilidad climática tienen mayor relevancia e intensidad sobre los recursos hídricos a nivel nacional, adquiriendo una alta complejidad en el análisis holístico, para la conservación y manejo de los cuerpos de agua superficiales y contrarrestar posibles efectos climáticos nacionales, regionales y locales.

Es importante establecer, que actualmente en la planificación del recurso hídrico se tiene la consideración que el clima no varía, y en algunos estadios de análisis, se realiza de forma aislada con información climatológica (de variabilidad climática estacional), hidrológica y de calidad del agua no detallado ni integrado en el contenido para la perspectiva del análisis en una cuenca hidrográfica, por ello la inclusión de la variable de la variabilidad climática estacional es significativa, dado que la variación (dimensión) espacial y temporal en la cuenca hidrográfica sería un elemento clave y representaría el comportamiento climático del área de estudio durante el trimestre, según los registros de la variables analizadas y con ello, se puede tomar decisión para el ordenamiento y planificación ambiental (*mediano y largo plazo con escenarios futuros de clima*), de la cuenca hidrográfica mediante el modelo de planificación ambiental hídrica estacional, y su aplicación tanto para cuencas con información ambiental disponible (instrumentada) o cuencas con poca o escasa información (poca instrumentada).

De acuerdo con lo anterior, un enfoque sistémico complejo de ordenamiento del recurso hídrico, es equilibrar (*no significa enfoque universal aceptable a todos*) la disponibilidad del agua, la variabilidad climática, la demanda del agua, las necesidades ambientales y el control de la contaminación, que proporciona la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante nuevos modelos de planificación (*para la toma decisiones, basado en escenarios integrados con adaptabilidad de las tendencias climáticas*), para facilitar la GIRH, organizar la información del agua y dar respuestas inmediatas en las cuencas hidrográficas, de las partes interesadas aguas arriba y aguas

abajo, teniendo en cuenta las limitaciones físicas y geográficas, y la infraestructura existente (Safavi, 2015; Zhang Y. , 2015).

Se ha observado un desarrollo de soluciones de la hidroeinformática en el tema de predicción, pronóstico y estimación en manejo de ríos, canales, inundaciones, irrigación, drenajes, plantas de tratamiento de aguas residuales y potables, estaciones de energía, manejo de aguas subterráneas, condiciones climatológicas y calidad del agua, en términos de análisis y aproximaciones numéricas en el ámbito ambiental y económico en ocasiones, siempre con el arquetipo de la simulación de las variables físicas y su interacción con el ambiente, mediante el manejo de datos, almacenamiento masivo, funcionalidad, visualización y representación gráfica de la complejidad del fenómeno hídrico.

Por ello, en la revisión exhaustiva de la literatura, existe un paradigma de abstracción de las realidades observadas en el ambiente y especialmente debido a la *Biocomplejidad* de las cuencas hidrográficas, con una interrelación de la información, sostenibilidad hídrica y la inteligencia artificial, especialmente en las temáticas de aprovechamiento, optimización, estimación, predicción y conservación de los recursos hídricos, lo que podría denominarse *hidroeinformática*, dentro del espectro, de considerar el agua como un recurso finito (*integra todos los procesos naturales y su cantidad no aumenta*), asociada a las soluciones de un área denominada *hidroingeniería*, para mejoramiento del análisis y modelación de las aproximaciones simbólicas del conocimiento específico del fenómeno de ambiente natural.

En ese sentido, en las técnicas computacionales utilizadas para la predicción o pronóstico de variables de calidad del agua e hidrológicas (*series hidrológicas*), modelos de identificación de fuentes de contaminación en ríos, costos del tratamiento del agua residual, clima, ambiente, entre otros, se basan en análisis de fenómenos aislados con técnicas de regresión lineal o no lineal en escalas espaciales y temporales, se han implementado técnicas de inteligencia artificial y relacionando modelos matemáticos y la correlación empírica, pero no integradas en el mismo modelo para realizar una representación abstracta a escala moderada de un reconocimiento de patrones de un sistema complejo denominado cuenca hidrográfica para la toma de decisiones.

Es significativo considerar, que el modelado de los parámetros de calidad del agua es un proceso no lineal, por ello, la parametrización física del modelo, en virtud de una emulación de un experto en la toma de decisión en una cuenca hidrográfica, es una imitación funcional de los resultados de un grupo de expertos con una alta precisión de aproximación a la parametrización inicial del sistema complejo analizado, lo que permite observar el nivel de complejidad, la representación del fenómeno y el rendimiento computacional de la emulación desarrollada, aproximándolo de esta forma, para determinar la estructura y arquitectura óptima, algoritmos de entrenamiento, validación y pruebas.

Finalmente, este documento establece que existe un vacío de conocimiento en términos de determinar la calidad ambiental de un cuerpo de agua superficial en las condiciones de trópico, con la aleatoriedad del clima (análisis por trimestres diciembre – febrero (DEF), marzo – mayo (MAM), junio – agosto (JJA) y septiembre – noviembre (SON)), analizando las relaciones entre calidad del agua ( $DBO_5$ ,  $N-NO_2$ ,  $P_{Total}$ , SST) y la precipitación (variable considerada como única entrada en la cuenca), la representación mediante un modelo (identificación del sistema ambiental) de la información empírica generada en un cuerpo de agua superficial (*primer acercamiento a la realidad, Biocomplejidad, caótica y desarrollable*) reproducible en las condiciones ambientales de la cuenca hidrográfica y sumado a lo antes descrito, la poca utilización de técnicas computacionales de inteligencia artificial para emular los criterios de los expertos.

Por ello, la sinergia construida entre la calidad del agua y la precipitación, la influencia de los factores de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en la cuenca hidrográfica y el planteamiento de un modelo para la toma de decisiones en una cuenca hidrográfica, desarrolla nuevos métodos y técnicas de

observación de la aproximación numérica y la abstracción ininteligible del sistema hídrico con rasgos de heterogeneidad (*partes distintas de la naturaleza*), anisotropía (*diferentes características*) y condiciones no estacionarias, considerando bondades en el análisis de la información, evaluación y estimación de una calidad ambiental en el tramo observado del cuerpo de agua superficial, generando propiedades de estabilidad y convergencias de inteligencia artificial, mediante el análisis de los datos de calidad del agua en el río y en el aporte de contaminación (*por vertimiento de agua residuales domésticas emitidas por los municipios influentes en la cuenca hídrica*), adicionado al fenómeno de variabilidad climática estacional (precipitación) según los patrones de las relaciones tierra y océano (trimestres DEF, MAM, JJA, SON), generan un proceso *hidroclimático* de análisis no lineal, debido a la complejidad de los fenómenos que los originan, por ello, el establecer técnicas computacionales de inteligencia artificial para emular los criterios de los expertos para realizar una aproximación de estimación de variables que están involucradas en este proceso, y posteriormente establecer niveles jerárquicos en el sistema complejo para establecer lineamientos para el ordenamiento, uso racional y control de la calidad ambiental, y con ello, acciones en la gestión del recurso hídrico.

Finalmente, durante el desarrollo de la presente tesis se publicaron nueve artículos científicos en revistas científicas especializadas nacionales e internacionales (categorizadas en pubindex y con índices de citacionales de SJR, JCR y SCI); también se realizaron quince ponencias (modalidad oral) en los eventos especializados científicos (Congresos, Seminarios y Simposios) nacionales e internacionales. De igual forma se realizaron dos estancias de investigación (pasantía de investigación) en la Universidad del Bio Bio (Concepción, Chile) y en el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC) en la República Dominicana.

Finalmente, durante el desarrollo de la tesis, se realizaron aportes en el conocimiento en términos de las ecuaciones econométricas de costos de inversión para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con variables caudal, DBO, SST, N y P; una metodología apropiada para la selección de tecnologías con expresión ponderada de agregación de producto o de promedio geométrico ponderado.; la normalización de variables DBO<sub>5</sub>, N -NO<sub>2</sub>, SST, P<sub>Total</sub> y Precipitación mediante el método de maximizar y minimizar variables; la integración de la variable precipitación con las variables de calidad del agua DBO<sub>5</sub>, N -NO<sub>2</sub>, SST y P<sub>Total</sub> en un modelo estadístico, matemático y analítico; la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para emular el criterio del grupo de expertos en términos de la calidad ambiental mediante Minería de Datos, Lógica Difusa, Red Neuronal Artificial y Enjambres de partículas y el modelo de planificación ambiental considerando la variabilidad climática estacional para cuerpos de agua superficiales.

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un modelo de planificación ambiental de la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad climática estacional mediante implementación computacional.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Analizar los factores de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que influyen en el comportamiento de la estructura ambiental en una cuenca hidrográfica.
- b. Establecer un proceso que permita desarrollar la normalización de variables de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y cuencas hidrográficas, agregados como calidad ambiental.
- c. Integrar la variabilidad climática estacional en el proceso de planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales.
- d. Desarrollar un modelo y/o estructura que permitan una representación de la planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional mediante una implementación computacional disponible.

### 1.3 CONTENIDO DEL DOCUMENTO.

El presente documento tiene el siguiente contenido:

- Capítulo I (Estado del Arte). Este capítulo contiene elementos teóricos de la revisión exhaustiva de la literatura especializada en términos de la conceptualización de la planificación ambiental y biocomplejidad en los recursos hídricos y su escasa integración con la variabilidad climática estacional, los recursos informáticos disponibles como soluciones específicas de hidrología, hidráulica o calidad del agua, pero no integradas entre sí y la escasa aplicación de la ingeniería de sistemas complejos mediante técnicas computacionales en la toma de decisiones en cuencas hidrográficas.
- Capítulo II (Metodología). Contiene aspectos para el desarrollo de la tesis doctoral en términos de la estructura metodológica desarrollada, método y diseño de investigación analítico – cuasi experimental con enfoque concurrente, con muestras trimestrales de información secundaria de precipitación y calidad del agua de la cuenca hidrográfica analizada y a su vez realizando la normalización de las variables del modelo para construir un modelo analítico mediante el análisis estadístico de los datos y una identificación del sistema, para posteriormente aplicar la técnica computacional de inteligencia artificial.
- Capítulo III (Resultados y Discusión). Se expone el desarrollo de la metodología propuesta en términos de análisis de los costos de inversión y selección de tecnologías de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en Cundinamarca; la ingeniería del software como un vehículo para la planificación ambiental en la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional; normalización de las variables de calidad del agua y precipitación para la planificación ambiental en la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional; vector de calidad ambiental; el método Delphi y modelo analítico para la planificación ambiental de la calidad de los recursos hídricos superficiales; análisis de correlaciones entre variables de calidad del agua y precipitación; identificación del modelo matemático que representa la cuenca hidrográfica y técnicas de inteligencia artificial para emular la calidad ambiental.
- Capítulo IV (Conclusiones). Se formulan conclusiones derivadas a de los resultados obtenidos.
- Reflexiones finales. En este último capítulo, se enuncian las limitantes, dificultades encontradas durante el desarrollo del trabajo de investigación, así mismo, las posibles líneas de investigación y trabajos futuros derivados del desarrollo de la tesis doctoral.

## 2 REFLEXIONES FINALES, LINEAS DE TRABAJO Y DESARROLLOS FUTUROS.

Del desarrollo del presente trabajo de investigación, se desprenden las reflexiones que se presentan a continuación, que contribuyen a construir líneas de investigación, trabajos y desarrollos futuros en este campo de investigación:

- a. Una posible línea derivada de la investigación, puede considerarse el ampliar el desarrollo de modelos de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales en términos de la variabilidad climática en las escalas interanual e interdecadal, evaluadas en otras cuencas hidrográficas con mayor información ambiental registrada.
- b. El modelo de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad climática estacional mediante implementación computacional, se puede aplicar a otras cinco (5) cuencas hidrográficas de tamaño pequeño y se puede considerar que la metodología propuesta funcionará, lo que significa que el modelo podría ser universal y por ello, se sugiere una validez estadística mediante el desarrollo del muestreo de diversas cuencas hidrográficas para encontrar la representatividad del universo (N) de cuencas hidrográficas. Como el modelo funciona en la cuenca hidrográfica del Río Bogotá (Cundinamarca, Colombia), se acepta que el modelo puede ser universal y la metodología puede ser aplicada a cinco (5) cuencas hidrográficas no instrumentadas, para evaluar el grado de capacidad de robustez, soporte y rango de bondad de la misma, en los determinantes para la toma de decisión ambiental en la cuenca hidrográfica y se sugeriría una validez estadística mediante la aplicación de un muestreo representativo de cuencas hidrográficas.
- c. Con el desarrollo del modelo de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad climática estacional mediante implementación computacional, puede implementarse en términos de la metodología en cuencas hidrográficas a gran escala que tengan mayor información ambiental en términos de calidad del agua y precipitación.
- d. El modelo de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad estacional mediante implementación computacional, podría ampliar las variables climáticas, en no solamente precipitación (variable de entrada de cuenca), sino que se puede adicionar temperatura del aire, humedad relativa, evapotranspiración y para calidad del agua otras variables de comportamiento no conservativo como temperatura del agua, pH y Coliformes fecales, para interrelacionar patrones significativos de comportamiento en la cuenca hidrográfica.
- e. Para el modelo de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad estacional mediante implementación computacional, puede explorarse otras técnicas computacionales de inteligencia artificial como estrategias evolutivas, red neurodifusa, algoritmos evolutivos u otros algoritmos que puedan emular los criterios de los expertos.
- f. Para la identificación del sistema mediante la información empírica ambiental generada por el cuerpo de agua superficial, se podría realizar un análisis en datos en tiempo continuo con transformadas como Fourier, Mellin, Hankel e inclusive Wavelet.
- g. El modelo de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos podría construirse también para cuerpos lentos e inclusive para aguas subterráneas.
- h. Para el modelo de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad climática estacional mediante implementación computacional, podría evaluarse para las condiciones del extra trópico.
- i. Para el modelo de planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad climática estacional mediante implementación computacional, podría evaluarse con menos variables y con más variables independientes.
- j. En términos de la naturaleza de los datos, para la integración de parámetros de calidad del agua y climatológicos, éstos son heterogéneos, debido a la discontinuidad en el registro de la información que le aporta una incertidumbre considerable y grado de complejidad, que conduce a una construcción de una base de datos adecuada para el análisis de los mismos.

#### **Limitantes del trabajo de investigación.**

- Una limitante significativa es la disponibilidad, continuidad en el registro y calidad de los datos de precipitación y calidad del agua reportada por la autoridad ambiental, dado que los registros de datos en su gran mayoría están desde el año 2008 en adelante en cuencas instrumentadas. Sin embargo en cuencas hidrográficas pequeñas o poco instrumentadas, el registro de los datos disponibles está desde el año 2011.

### 3 CONTRASTACIÓN

A continuación se realiza una contrastación de los objetivos específicos y la hipótesis con el desarrollo de los resultados obtenidos.

Tabla 31. Contrastación de los objetivos específicos, hipótesis y resultados obtenidos.

CATEGORÍA	ASPECTO DE LA TESIS	DESARROLLO/PRODUCTOS RESULTADOS
Objetivos específicos e Hipótesis	<u>Objetivos específicos</u> 1. Analizar los factores de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que influyen en el comportamiento de la estructura ambiental en una cuenca hidrográfica.	Ecuaciones econométricas para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales; metodología para selección de tecnologías de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales; Localización de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.
	2. Establecer un proceso que permita desarrollar la normalización de variables de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y cuencas hidrográficas, agregados como calidad ambiental.	Método de maximizar y minimizar variables de DBO <sub>5</sub> , N -NO <sub>2</sub> , SST, P <sub>Total</sub> y Precipitación; Vector de calidad ambiental.

	3. Integrar la variabilidad climática estacional en el proceso de planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales.	Ingeniería de software en la planificación ambiental; modelo analítico, análisis de correlaciones entre variables de calidad del agua y precipitación.
	4. Desarrollar un modelo y/o estructura que permitan una representación de la planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional mediante una implementación computacional disponible.	Modelo estadístico; modelo matemático; técnicas de inteligencia artificial para emular el criterio de grupo de expertos (Minería de Datos y Red Neuronal Artificial mediante algoritmo Levenberg Marquardt)
	<i>Hipótesis: ¿Cómo se puede desarrollar un modelo que permita la representación de la planificación ambiental para la calidad de los recursos hídricos superficiales considerando su variabilidad climática estacional, mediante una implementación computacional disponible?</i>	Se construyó un modelo estadístico y matemático que permite una representación de la planificación ambiental y que considera la variabilidad climática estacional mediante minería de datos y red neuronal artificial (algoritmo Levenberg Marquardt)

#### 4 APORTES

Los aportes específicos al conocimiento que se derivan de este trabajo de investigación:

- a. Ecuaciones econométricas de costos de inversión para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con variables caudal, DBO, SST, N y P.
- b. Metodología para la selección de tecnologías con expresión ponderada de agregación de producto o de promedio geométrico ponderado.
- c. Normalización de variables DBO<sub>5</sub>, N -NO<sub>2</sub>, SST, P<sub>Total</sub> y Precipitación mediante el método de maximizar y minimizar variables.
- d. Integrar la variable precipitación con las variables de calidad del agua DBO<sub>5</sub>, N -NO<sub>2</sub>, SST y P<sub>Total</sub> en un modelo estadístico, matemático y analítico.
- e. Aplicación de técnicas de inteligencia artificial para emular el criterio del grupo de expertos en términos de la calidad ambiental mediante Minería de Datos, Lógica Difusa, Red Neuronal Artificial y Enjambres de partículas.
- f. Modelo de planificación ambiental considerando la variabilidad climática estacional para cuerpos de agua superficiales

#### 5 SOCIALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS

A continuación se realiza un resumen de la socialización de los resultados obtenidos mediante artículos científicos y ponencias en eventos internacionales y nacionales.

Tabla 32. Resumen de socialización de los resultados obtenidos.

CATEGORÍA	ASPECTO DE LA TESIS	DESARROLLO/PRODUCTOS RESULTADOS
<p>Objetivos específicos y productividad de artículos (Aportes y generación de nuevo conocimiento)</p>	<p>Objetivos específicos 1. Analizar los factores de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que influyen en el comportamiento de la estructura ambiental en una cuenca hidrográfica.</p>	<p><b>Artículo:</b> Analysis of the investment costs in municipal wastewater treatment plants in Cundinamarca. Revista Dyna Vol 82 (192). August 2015; <b>Artículo:</b> Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Revista Tecnura Vol 19 (46) October 2015; <b>Artículo:</b> Theoretic similitude of the aerobic biological growth kinetics for the stabilization of organic matter in wastewaters treatment. Revista Tecnura Vol. 19 (44), April 2015; <b>Artículo:</b> Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia. Revista Salud Publica, Vol. 18 (5), 2016.</p>

	2. Establecer un proceso que permita desarrollar la normalización de variables de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y cuencas hidrográficas, agregados como calidad ambiental.	<b>Artículo:</b> análisis por medio de la normalización de variables para un modelo de planificación ambiental hídrica estacional. Revista Obras y proyectos Vol. 20, 2016.
	3. Integrar la variabilidad climática estacional en el proceso de planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales.	<b>Artículo:</b> Software engineering as a vehicle for water resources environmental planning. Revista tecnura Vol 18. December 2014. <b>Artículo:</b> Integration of the Stationality Climate Variability to a Model of Hidric Environmental Planning. Revista ChemTech, Vol 9 (12). 2016; <b>Artículo:</b> Model of Water Environmental Planning Seasonal, revista International Journal of Applied Environmental Sciences Vol 11 (5), 2016. <b>Artículo:</b> Pahicmetria, a Model of Metric in Environmental Hydric Planning, Vol 6 (1), 2016.
	4. Desarrollar un modelo y/o estructura que permitan una representación de la planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional mediante una implementación computacional disponible.	<b>Artículo:</b> El análisis del ciclo de vida aplicada a las plantas de tratamiento de aguas residuales. Revista Ciencia y Sociedad Vol. 41 (3), 2016.

CATEGORÍA	ASPECTO DE LA TESIS	DESARROLLO/PRODUCTOS RESULTADOS
Objetivos específicos y productividad de ponencias en eventos científicos (Apropiación social del conocimiento)	Objetivos específicos 1. Analizar los factores de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que influyen en el comportamiento de la estructura ambiental en una cuenca hidrográfica.	<b>Ponencia:</b> 58 Congreso Internacional de ACODAL 2015 (Planificación ambiental hídrica estacional: función de costos mediante análisis multivariado; <b>Ponencia:</b> VIII Simposio Internacional de Ingeniería Industrial: actualidad y nuevas tendencias 2015. Universidad del Bio Bio, Chile. 2015: Planificación Ambiental Hídrica Estacional: <b>Ponencia:</b> Una Metodología Para La Selección De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales Municipales; <b>Ponencia:</b> Planificación Ambiental Hídrica Estacional: Normalización De Variables Ambientales.

	<p>2. Establecer un proceso que permita desarrollar la normalización de variables de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y cuencas hidrográficas, agregados como calidad ambiental.</p>	<p><b>Ponencia:</b> VIII Simposio Internacional de Ingeniería Industrial: actualidad y nuevas tendencias 2015. Universidad del Bio Bio, Chile. 2015: Planificación Ambiental Hídrica Estacional: Normalización De Variables Ambientales; <b>Ponencia:</b> II seminario nacional en hidrología y contaminantes ambientales 2017, Recursos Hídricos: inclusión de la planificación ambiental, variabilidad climática y estrategias de ordenamiento.</p>
	<p>3. Integrar la variabilidad climática estacional en el proceso de planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales.</p>	<p><b>Ponencia:</b> II Congreso Internacional en tecnologías limpias 2015: Modelo de planificación hídrica estacional: aspectos de una planificación en cuencas hidrográficas; <b>Ponencia:</b> 59 Congreso AIDIS ACODAL 2016: Planificación Ambiental Hídrica Estacional: variabilidad climática y la interrelación con la calidad del agua en una cuenca. <b>Ponencia:</b> XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2016, Variabilidad climática estacional: inclusión de la planificación ambiental en los recursos hídricos.</p>
	<p>4. Desarrollar un modelo y/o estructura que permitan una representación de la planificación ambiental de los recursos hídricos superficiales considerando la variabilidad climática estacional mediante una implementación computacional disponible.</p>	<p><b>Ponencia:</b> III Congreso internacional nuevas tendencias en la gestión del conocimiento de la ingeniería 2015: Planificación ambiental hídrica estacional: una estrategia de planificación en los recursos hídricos; II <b>Ponencia:</b> Segundo Congreso nacional de ciencias ambientales 2015, Planificación ambiental hídrica estacional: modelo de métrica en la planificación ambiental; <b>Ponencia:</b> Congreso internacional de investigación científica MESCYT 2016, Planificación ambiental hídrica estacional: condiciones para la toma de decisiones en una cuenca hidrográfica. <b>Ponencia:</b> 60 Congreso Internacional ACODAL 2017, Planificación ambiental estacional: estudio de caso cuenca del río Bogotá. <b>Ponencia:</b> XVI Congreso internacional XXII Congreso Nacional de ciencias ambiental 2017, Análisis de variables: comportamiento estadístico de las variables de calidad del agua y precipitación en un modelo de toma de decisiones para la cuenca del Río Bogotá; <b>Ponencia:</b> gestión de los recursos hídricos: interrelación de la variabilidad climática, ordenamiento y planificación ambiental.</p>

CATEGORÍA	ASPECTO DE LA TESIS	DESARROLLO/PRODUCTOS RESULTADOS
-----------	---------------------	---------------------------------

Fortalecimiento de la comunidad científica	Formación de un investigador que contribuya con el avance del conocimiento científico y tecnológico.	Un investigador formado a nivel doctoral.
--	--	---

Fuente: autor.

## 6 REFERENCIAS.

Abbassi, T. (2012). *Water quality indices*. Oxford UK: Elsevier.

Abdulmohsin, H. (2016). Past, present and prospect of an Artificial Intelligence (AI) based model for sediment transport prediction. *Journal of Hydrology*, Volumen 541, pp 902-913.

Acevedo, D. (2016). Estudio de los instrumentos normativos de ordenamiento ambiental del municipio de Turbo (Antioquia) en el marco de las políticas de ordenamiento ambiental de Colombia. *Luna Azul*, Numero 42, pp 167-184.

Agresti, A. (2002). *Categorical data analysis*. New York: Wiley.

Alonso, F. (2011). *Application of Intelligent Algorithms to Aerospace Problems*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia. E.T.S. Ingeniería Informática. Dpto. Informática y Automática.

Amezquita, G. (2009). Servicio GRID para la clasificación no supervisada de imágenes satelitales utilizando autómatas celulares. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, Volumen 19, numero 2, pp 59-76.

APHA. (2009). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations, Second Edition*. USA: American Public Health Association.

Aqil, M. (2007). Analysis and prediction of flow from local source in a river basin using a Neuro-fuzzy modeling tool. *Journal of Environmental Management*, Numero 85, pp 215 - 223.

Arceivala D.J. (1986). *Wastewater Treatment for Pollution Control*. Nueva Delhi: McGraw-Hill.

- Aristizábal O.L. (2012). Referencias para costos de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales. En *Las ciudades y el agua. Ingenieros de EPM investigan sobre los sistemas hídricos urbanos*. (págs. 337 - 348). Medellín: Universidad de Medellín.
- Armendáriz, E. (2014). *Ingeniería Bioinspirada*. Victoria: Omnia Science. Universidad Politécnica de Victoria.
- Aronoff, S. (1989). *Geographic Information Systems: a management perspective*. Ottawa, Canadá: WDL Publications.
- Aronoff, S. (1989). *Geographic Information Systems: a management perspective*. Ottawa, Canadá: WDL Publications.
- Arthur J.P. (1983). *Notes on the Design and Operation of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates of Developing Countries*. Washintong: The World Bank.
- ASCE. (2000). *Artificial neural networks in hydrology—I: preliminary concepts*. USA: ASCE Task Committee, pp 115 - 123.
- Astigarraga, E. (2014). *El método Delphi*. San Sebastian, España: Universidad de Deusto.
- Ay, M. (2014). Modelling of chemical oxygen demand by using ANNs, ANFIS and k-means clustering techniques. *Journal of Hydrology*, Numero 511, pp 279 - 289.
- Azevedo J.M. (1976). *Manual de Hidráulica*. Mexico: Editorial Harla S. A.
- Babea, I. (2010). *El problema del agua y la inteligencia artificial*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Balestrini, M. (2001). *Cómo se elabora el proyecto de investigación*. Caracas, Venezuela: BL Consultores asociados.
- Barba - Romero, S. (1987). Panorámica actual de la decisión multicriterio discreta. *Investigaciones económicas*, 279 - 308.
- Barba - Romero, S. (1987). Panorámica actual de la decisión multicriterio discreta. *Investigaciones económicas*, 279 - 308. Volumen XI. No 2.
- Barba, S. (2000). *Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice*. USA: Kluwer Academic Publishers.
- Barbará. (1981). *Equipamientos para tratamiento de aguas*. Sao Paulo.
- Benítez, R. (2013). *Inteligencia artificial avanzada*. España: UOC. Fundación Universidad Oberta de Cataluña.
- Bermeo, L. (2015). Estimation of the particle size distribution of colloids from multiangle dynamic light scattering measurements with particle swarm optimization. *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, Volumen 35, numero 1, pp 49-54.
- Bernal D.P. (2003). Guía de selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. *Seminario internacional de métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales*, (págs. 19 - 27). Cartagena Colombia.
- Beskow, S. (2016). Artificial intelligence techniques coupled with seasonality measures for hydrological regionalization of Q90 under Brazilian conditions. *Journal of Hydrology*, Volumen 541, pp 1406-1419.

- Blank, L. (2002). *Ingeniería Económica*. México: Mc Graw Hill Interamericana.
- Bonini, C. (2000). *Análisis cuantitativo para los negocios*. Bogotá: Mc Graw Hill Interamericana.
- Borges, C. (2013). *Algoritmos bioinspirados*. Cantabria, España: Universidad de Cantabria.
- Bowden, G. (2005). Input determination for neural network models in water resources applications. Part 1— background and methodology. *Journal of Hydrology*, Numero 301, pp 75 - 92.
- Boyacioglu, H. (2012). Utilization of environmetric & index methods as water quality comparative assessmente tools focusing on heavy metal content. *Archives of environmental protection*, 17 - 28. Volume 38, No 3.
- Brilhante, O. (2003). *Municipal Environmental Planning and Management Training*. The Netherlands: IHS.
- Buitrago C.A. (1994). *Evaluación técnica y económica de sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Cabero, J. (2014.). Empleo del método Delphi y su empleo en la investigación en comunicación y educación. . *Revista electrónica de tecnología educativa*. , Numero 48, pp 1 - 16.
- CAF. (2009). *Caminos para el futuro. Gestión de la infraestructura en América Latina*. Caracas, Venezuela: Corporación andina de fomento (CAF).
- Calderón, E. (2014). *Desarrollo de un sistema de control neuro difuso de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego*. . Lima, Perú: Pontificia Universidad Catolica del Perú. Maestría en Ingeniería de control y automatización. .
- Cano, J. (2014). *Metódos de inteligencia artificial aplicados a química computacional en entornos de computación de alto rendimiento*. Alicante, España: Universidad de Alicante.
- Canter, L. (2000). *Manual de evaluación de impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto*. España: Mc Graw Hill Interamericana.
- Caracciolo, D. (2016). Mechanisms of shrub encroachment into Northern Chihuahuan Desert grasslands and impacts of climate change investigated using a cellular automata model. *Advances in Water Resources*, Numero 91, pp 46-62.
- Cárdenas, A. (2012). *Inteligencia Artificial, métodos Bio - Inspitados: un enfoque funcional para las ciencias de la computación*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Cardozo, E. (2011). Aprendizaje estructural de redes bayesianas: un enfoque basado en puntaje y búsqueda. . *Ciencia e ingeniería neogranadina*, Volumen 21, Numero 1, pp 29 - 50.
- Carvajal, L. (2013). Un modelo de gestión de la calidad y cantidad de agua con lógica difusa gris para el río Aburrá. *Ingenierías, Universidad de Medellin*, Volumen 12, numero 22, pp 59-74.
- Cherkassky, V. (2006). Computational intelligence in earth sciences and environmental applications: Issues and challenges. *Neural Network*, Numero 19, pp 113 - 121.
- Coelho, M. (2010). *Multicriteria Decision Support System to Delineate Water Resources Planning and Management Regions*. Colorado: Colorado State University.

- Costa, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes*, 74 - 80.
- Creswell, J. (2007). *Qualitative inquiry & research design: choosing among five approaches*. . UK: SAGE publications.
- Crites R. (2000). *Small and decentralized wastewater management systems*. New York: Mc Graw Hill.
- Crittenden J. (2005). *Water treatment: principles and design. Second edition*. USA: Wiley & sons INC.
- Cude, C. (2001). Oregon water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 125 - 137. Numero 20.
- Cuevas, V. (2015). *Modelo de gestión de un embalse en tiempo real durante avenidas basado en redes Bayesianas entrenadas con el método de optimización PLEM*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos. .
- D'Ambrosio, D. (2001). A cellular automata model for soil erosion by water. *Phys. Chem. Earth*, Volumen 26, Numero 1, pp 33-39.
- DAMA . (2001). *La calidad del agua del Río Bogotá*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá. Departamento Administrativo del Medio Ambiente. .
- DAMA. (2004). *Guía técnica para la restauración de áreas de ronda y nacimientos del distrito capital*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá. Departamento Técnico administrativo del medio ambiente. .
- De Carvalho F, A. (2001). *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento - aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- De los Cobos, S. (2014). Colonia de abejas artificiales y optimización por enjambre de partículas para la estimación de parámetros de regresión no lineal. *Revista de matemática: teoría y aplicaciones*. , Volumen 21, numero 1, pp 107 - 126.
- Di Gregorio, S. (1999). An empirical method for modelling and simulating some complex macroscopic phenomena by cellular automata. *Future Generation Computer Systems*, Numero 16, pp 259-271.
- Dinar, S. (2015). Climate change, conflict, and cooperation: Global analysis of the effectiveness of international river treaties in addressing water variability. *Political Geography*, 55 - 66.
- Dogan, E. (2009). Modeling biological oxygen demand of the Melen River in Turkey using an artificial neural network technique. *Journal of Environmental Management*, Numero 90, pp 1229 -1235.
- Dominguez, E. (2000). PROTOCOLO PARA LA MODELACION MATEMATICA DE PROCESOS HIDROLOGICOS. *Meteorología Colombiana*, 33 - 38.
- Domokos, G. (2004). Discrete and continuous state population models in a noisy world. *Journal of Theoretical Biology*, 535 - 545. Volume 227.
- Domokos, G. (2004). Discrete and continuous state population models in a noisy world. *Journal of Theoretical Biology*, 535 - 545.
- Droste R. (1997). *Theory and practice of water and wastewater treatment*. New York: John Wiley & Sons Inc.

- Dukhovny, V. (2005). *Integrated Water Resources Management, Experience, and Lessons Learned from Central Asia-towards the Fourth World Water Forum.* , Tashkent.: Inter-State Commission for Water Coordination in the Aral Sea Basin.
- Dumedah, G. (2015). Toward essential union between evolutionary strategy and data assimilation for model diagnostics: An application for reducing the search space of optimization problems using hydrologic genome map. *Environmental Modelling & Software*, 342 - 352. Volumen 69.
- Echeverría, J. (2011). *Evaluación de la Vulnerabilidad Futura del Sistema Hídrico al cambio climático.* Costa Rica: PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL.
- Eckenfelder W. (2000). *Industrial water pollution control.* New york: Mc Graw Hill.
- Elbeltagi, E. (2005). Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 43-53. Volumen 19.
- EPA. (1983). *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes.* USA: Environmental Protection Agency.
- EPA. (2003). *Design Criteria; Rotating Biological Contactors.* Ohio USA: EPA.
- EPM. (2012). *Las ciudades y el agua. Ingenieros de EPM investigan sobre los sistemas hídricos urbanos.* Medellín: Universidad de Medellín.
- Erkan, M. (2009). River flow estimation from upstream flow records by artificial intelligence methods. *Journal of Hydrology*, Numero 369, pp 71 - 77.
- ESA. (2002). *What is Biocomplexity? Biocomplexity.* USA: Ecological Society of America.
- Escobar, H. (2016). Aplicaciones de minería de datos en marketing. . *Publicando*, Volumen 3, Numero 8, pp 503-512.
- Escobar, M. (2016). Diseño de un sistema experto para la reutilización de aguas residuales. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, Volumen 26, numero 2, pp 21- 34.
- Espitia, H. (2016.). Revisión sobre modelos de enjambres de partículas con características de vorticidad. . *Ingenium. Revista de la Facultad de Ingeniería*, Año 17, Numero 34, pp 162-183.
- EWP. (2010). *Recursos hídrico: resumen del segundo informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo.* Schweizerische: European Water Partnership. Green Facts.
- Fair G. (1968). *Abastecimiento de aguas y remoción de aguas residuales.* Mexico: Limusa.
- Ferrer J. (2008). *Tratamiento biológicos de aguas residuales.* Valencia: Universidad politécnica de valencia.
- Fields J. (1987). Aguas residuales de café. *Curso-Seminario de Tratamiento Anaerobio de residuos*, (págs. 1 - 5). Cali.
- Finn, V. (2007). *Bayesian networks and decision graphs.* USA: Springer Science + Business Media LLC. .
- Firat, M. (2007). River flow estimation using adaptive neuro fuzzy inference system. *Mathematics and Computers in Simulation*, Volumen 75, pp 87-96.
- Foley J. et al. (2010). Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water research*, 1654 - 1666.

- Folino, G. (2006). A model based on cellular automata for the parallel simulation of 3D unsaturated flow. *Parallel Computing*, Volumen 32, pp 357-376.
- Fresenius W. (1991). *Manual de disposición de aguas residuales*. Lima: Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias ambientales (CEPIS/OPS/OMS).
- Friedler E. (2006). Effects of design flow and treatment level on construction and operation costs of municipal wastewater treatment plants and their implications on policy making. *Water research*, 3751 - 3758.
- Garces, L. (2005). Secuencia operativa de componentes mediante sistemas neurodifusos para analisis de confiabilidad. *Scientia et Technica*, Año XI, Numero 29, pp 31 - 36.
- García. (2009). *Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) y Soft Computing*. España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- García, A. (2006). *Simulación de sistemas dicretos*. . Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- García, M. (2007). *Aplicación de técnicas metaheurísticas en minería de datos*. España: Universidad de Laguna. Servicio de publicaciones. Ciencias y tecnologías.
- García, M. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y Competitividad*, 19 - 29.
- García, M. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes*, 60 - 64.
- García, M. (2012.). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes*, 60 - 64. Enero - Junio. No 33.
- García, M. (2013). El método Delphi para la consulta a expertos en la investigación científica. *Revista Cubana de Salud Pública*, Volumen 39, Número 2, pp 253- 267.
- Garduño, R. (2013). *La medición de la competitividad en México: ventajas y desventajas de los indicadores*. . Mexico: CIDE.
- George, B. (2011). An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies. *Agric Water Managment*, 733 - 746.
- Gharibi, H. (2012). Development of a dairy cattle drinking water quality index (DCWQI) based on fuzzy inference systems. *Ecological Indicators*, 228 - 237. September. No 228.
- Ghazy M.R. (2011). Economic and environmental assessment of sewage sludge treatment processes application in egypt. *International water technology journal*, 1 - 17.
- Gloyna E.F. (1971). *Waste Stabilization Ponds*. Ginegra: World Health Organization.
- Gómez Orea, D. (2011). Evaluación Ambiental Estratégica (EAE); Un Instrumento Preventivo de gestión Ambiental. *Revista salud y ambiente*, 9 - 16. Volumen 11. No 1-2.
- Gomez, E. (2010). Aplicación del modelo neurodifuso ANFIS vs redes neuronales, al problema predictivo de caudales medios mensuales del río Bogota en Villapinzón. . *Revista Tecnura*, Volumen 14, numero 27, pp 18 - 29.

- Gómez, N. (2011). *Sistemas Bio-Inspirados: un marco teórico para la ingeniería de sistemas complejos*. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario.
- Gonzalez, J. (2017). Diseño de relajadores de campo eléctrico usando optimización por enjambre de partículas y el método de elementos finitos. *Tecnológicas*, Volumen 20, Numero 38, pp 27 - 39.
- Gonzalez, L. (2012). Exploración con redes neuronales artificiales para estimar la resistencia a la compresión, en concretos fibroreforzados con acero. . *Ciencia e ingeniería neogranadina*, Volumen 22, numero 1, pp 19 - 41.
- Grafe, C. (2002). *Idaho: river ecological assesment framework an integrated approacho*. Boise, Idaho: Idaho Department of Environmental Quality.
- Gross, P. (1998). *Indicadores de calidad y gestión ambientales*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Gupta, J. (2005). *Incorporación de los principios de la gestión integrada de los recursos hídricos en los marcos legales de América latina*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- Gutiérrez, M. (2010). *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Diagnóstico inicial, avances, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica*. Washington USA: Banco Interamericano de Desarrollo BID.
- GWP. (2009). *Manual para la gestión integrada de los recursos hídricos en cuencas*. Londres UK: Global Water Partnership.
- Hair, J. (1999). *Análisis multivariante*. New York: Pearson Educación.
- Hammer M.J. (2012). *Water and wastewater technology*. USA: Prentice Hall.
- Harrison L. (1996). *Manual de auditoria medioambiental. Higiene y seguridad*. Mexico D.F.: McGraw Hill Interamericana editores S.A.
- Hernández A. (1996). *Depuración de aguas residuales*. Madrid España: Servicio de publicaciones de escuela de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Hernández Sancho F. (2011). Cost modelling for wastewater treatment processes. *Desalination*, 1 - 5.
- Hernández, R. (2010). *Metodología de la investigación*. . México: Mc Graw Hill.
- Hillman, B. (2012). An analysis of the allocation of Yakima River water in terms of sustainability and economic efficiency. *Environmental Management*, 103 - 112.
- Hinojosa, A. (2012). El método de enjambre de partículas y el criterio de mínima entropía en el diseño óptimo de un disipador de calor. *Ingenierías, Universidad de Medellín*. , Volumen 11, Numero 20, pp 203-213.
- Hong Y.S. (2003). Analysis, Analysis of a municipal wastewater treatment plant using a neural network-based pattern. *Water Research*, 1608–1618.
- Hurtado J. (2000). *Metodología de la investigación holística*. . Caracas: Fundación SYPAL.
- IDEAM. (2002). *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. . Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - República de Colombia.

- IDEAM. (2004). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá. DAMA. IDEAM.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del agua*. Bogotá: IDEAM.
- IPCC. (2008). *Climate Change and water*. . UK: Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Technical Paper VI. WMO. UNEP. OSD. 2011.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. USA: PNUMA OMN.
- Itati, M. (2012). Revisión de algoritmos de Redes Neuronales en dos herramientas de Minería de Datos. *Técnica administrativa*, Volumen 11, numero 4, pp 10-15.
- Izaguirre, C. (2010). *Estudio de la variabilidad climática de valores extremos de oleaje. Tesis doctoral*. Cantabria, España: Universidad de Cantabria. Departamento de Ciencias y Técnica del Agua y del Medio Ambiente.
- Izquierdo J. (2008). Design optimization of wastewater collection networks by PSO. *Computers and Mathematics with Applications*, 777–784.
- Johnson, D. (2000). *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*. New York: International Thomson Editores,.
- Kaltech, A. (2008). Review of the self-organizing map (SOM) approach in water resources: Analysis, modelling and application. *Environmental Modelling & Software*, Numero 23, pp 835 - 845.
- Kassogué, H. (2017). A two scale cellular automaton for flow dynamics modeling (2CAFDYM). *Applied Mathematical Modelling*, Numero 43, pp 61-77.
- Kaveh, A. (2009). Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures. *Computers and Structures*, 267-283. Volumen 87.
- Kaveh, A. (2015). An improved magnetic charged system search for optimization of truss structures with continuous and discrete variables. *Applied Soft Computing*, 400 - 410. March. Volume 28.
- Kaveh, A. (2015). An improved magnetic charged system search for optimization of truss structures with continuous and discrete variables. *Applied Soft Computing* , 400 - 410.
- Ketabchi, H. (2015). Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. *Journal of Hydrology*, 193-213. Volumen 520.
- Krasnopolsky, V. (2006). Complex hybrid models combining deterministic and machine learning components for numerical climate modeling and weather prediction. *Neural Networks*, Volumen 19, pp 122 - 134.
- kreyszig, E. (1984). *Advanced engineering mathematics*. New York: Jhon Wiley & sons inc.
- Kumar, A. (2016). Bio inspired computing – A review of algorithms and scope of. *Expert Systems With Applications*, 20-32. Volumen 59.
- Kundzewicz, Z. (2004). *Concept paper on cross-cutting theme: water. Progress of Working Group II towards the IPCC*. UK: IPCC PNUMA OMM. Fourth Assessment Report (Ar4).
- Lawrence A.W. (1970). *Unifield basis for biological treatment. Design and operation*. . USA: ASCE.
- Leitmann, J. (1999). *Sustaining Cities: Environmental Planning and Management in Urban Design*. US.

- Leitmann, J. (1999). *Sustaining Cities: Environmental Planning and Management in Urban Design*. USA.
- Lerma, N. (2015). Assessment of evolutionary algorithms for optimal operating rules design in real Water Resource Systems. *Environmental Modelling & Software*, 425 - 436. Volumen 69.
- Lettinga G. (1991). UASB – process design for various types of wastewaters. *Water Science and Technology*, 87–107.
- Lima, J. (2006). Optimización de Enjambre de Partículas aplicada al Problema del Cajero Viajante Bi-objetivo. *Revista iberoamericana de inteligencia artificial*, Volumen 32, pp 67-76.
- López, J. (2012). Caracterización del modelo HEC - HMS en la cuenca del Río Arga en Pamplona y aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y proyectos*, 15- 30. Numero 12.
- López, J. (2015). *Algoritmos bioinspirados aplicados al control de formaciones de múltiples nanorobots móviles*. Ciudad Real, España: Universidad de Castilla - La Mancha. Escuela Superior de Informática. .
- Maier, H. (2010). Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: Current status and future directions. *Environmental Modelling & Software*, Numero 25, pp 891-909.
- Makridakis, S. (2017). The Forthcoming Artificial Intelligence (AI) Revolution: Its Impact on Society and Firms. *Futures* , Volumen 10. pp 2 - 29.
- Maldonado, C. (2010). *Modelamiento y simulación de sistemas complejos*. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario.
- Malina J.F. (1992). *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal waste*. Pensilvania USA: Ed. Technomic Publishing Company.
- Mara D. (1997). *Design manual for waste stabilization ponds in india*. . Leeds: University of Leeds.
- Mariño, M. (2001). *Integrated Water Resources Management*. USA: International Assn of Hydrological Sciences.
- Márquez, H. (1999). Métodos matemáticos de evaluación de factores de riesgo para el patrimonio arqueológico: una aplicación GIS del método de jeraquías analíticas de TL SAATY. *Revista de prehistoria y arqueología de la Universidad de Sevilla*, 21 - 37.
- Martins, E. (2012). A modified Primal–Dual Logarithmic-Barrier Method for solving the Optimal Power Flow problem with discrete and continuous control variables. *European Journal of Operational Research*, 616 - 622. Volume 222. No 3.
- Martins, E. (2012). A modified Primal–Dual Logarithmic-Barrier Method for solving the Optimal Power Flow problem with discrete and continuous control variables. *European Journal of Operational Research*, 616 - 622.
- MAVDT. (2004). *Gestión integral del agua*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Dirección de agua potable y saneamiento básico y ambiental.
- McCarty P. (1985). Historical Trends in the Anaerobic Treatment of Dilute Wastewaters. *Proceedings of the Seminar/Workshop Anaerobic Treatment of Sewage* (págs. 3 - 15). USA: University of Massachusetts at Amherst.
- McGarry. M.G. (1970). *Stabilization pond design criteria for tropical Asia*. Kansas: Ed. R.E. McKinney, Lawrence.

- MDE. (2002). *Sector de agua potable y saneamiento básico. Retos y resultados*. . Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección general de agua potable y saneamiento básico. .
- Mediero, L. (2007). *Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas aplicadas sobre un modelo hidrológico distribuido*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Medina, F. (2014). Funcionalidades de la minería de datos. . *Revista Ingeniería y región*, Volumen 12, Numero Noviembre, pp 31 - 40.
- Meire, P. (2008). Towards integrated water management. *Earth and Environmental Sciences*.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse. 4 edition*. New york: Mc Graw Hill.
- Mey Liou, S. (2004). A generalized water quality index for taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 35 - 52. Volume 96. Aug - Sep. No 1-3.
- Millar, D. (2004). *Integrating City Planning And Environmental Improvement: Practicable Strategies For Sustainable Urban Development*. London UK.
- Millar, D. (2005). *Urban Environmental Planning: Policies Instruments And Methods In An International Perspectiva*. UK.
- MINAMBIENTE. (2010). *Política Nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. Bogotá: Ministerio de Ambiente.
- MINAMBIENTE. (2013). *Plan hídrico nacional*. Bogotá: Ministerio de Ambiente.
- MMA. (2001). *Política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia*. Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente.
- Molinos M. (2010). Economic feasibility study for wastewater treatment: a cost - benefit analysis. *Science of the environmental*, 4396 - 4402.
- Montealegre, J. (2000). Variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño- La Niña oscilación del Sur y efecto en el patron pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 7 - 21.
- Monzonís, M. (2015). A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 482 -493.
- Mori, J. (2015). Planning and scheduling of steel plates production. Part I: Estimation of production times via hybrid Bayesian networks for large domain of discrete variables. *Computers and Chemical Engineering*, 113 - 134. Volume 79.
- Mori, J. (2015). Planning and scheduling of steel plates production. Part I: Estimation of production times via hybrid Bayesian networks for large domain of discrete variables. *Computers and Chemical Engineering*, 113 - 134.
- MPF. (2008). *Plan nacional federal de los recursos hídricos*. Buenos aires: Graficas especiales S.A.
- Noori, R. (2015). Uncertainty analysis of support vector machine for online prediction of five-day biochemical oxygen demand. *Journal of Hydrology*, Numero 527, pp 833 - 843.

- Nourani, e. a. (2017). Conjunction of radial basis function interpolator and artificial intelligence models for time-space modeling of contaminant transport in porous media. *Journal of Hydrology*, Numero 548, pp 569-587.
- Nourani, V. (2017). Conjunction of wavelet transform and SOM-mutual information data pre-processing approach for AI-based Multi-Station nitrate modeling of watersheds. *Journal of Hydrology*, Numero 548, pp170-183.
- Novoa, P. (2013). *Técnicas avanzadas de optimización en ambientes dinámicos*. Granada, España: Universidad de Granada. Departamento de ciencias de la computación e inteligencia artificial. .
- OEA. (1978). *Calidad Ambiental y Desarrollo de Cuencas Hidrográficas: un Modelo para Planificación y Análisis Integrado*. Washington D.C.: Organización de los Estados Americanos/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Olmo, J. (2013). *Minería de datos mediante programación automática con colonias de hormigas*. Cordoba, España: Universidad de Cordoba, Escuela politécnica superior, departamento de informática y análisis numérico.
- Onkal G. (2006). Cost analysis of alternative methods for wastewater handling in small communities. *Journal of environmental management*, 357 - 363.
- Pabón, D. (1998). *Colombia en el ambiente global*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios. Bogotá: IDEAM.
- Pai, T. (2011). Predicting effluent from the wastewater treatment plant of industrial park based on fuzzy network and influent quality. *Applied Mathematical Modelling*, Numero 35, pp 3674 -3684.
- Paolini, J. (2013). *Una propuesta metodológica para la modelación y prospección de la sostenibilidad de las cuencas hidrográficas en la Guayana Venezolana*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Partal, T. (2007). Wavelet and neuro-fuzzy conjunction model for precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*, Numero 342, pp 199 - 212.
- Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. España: Mc Graw Hill.
- Pilar, J. (2011). La gestión de aguas: trabajo en red y planificación integrada. En J. Bertoni, *Tecnología, investigación y gestión* (págs. 72-73). Córdoba, Argentina. : Centro de estudios y tecnología del agua. Universidad Nacional de Córdoba.
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Mexico: Alfaomega.
- Porto, M. (2008). Gestao de bacias hidrograficas. *Estudos Avancados*, 43 - 60.
- Quesada, P. (2013). Efficient 2D and 3D watershed on graphics processing unit: block-asynchronous approaches based on cellular automata. *Computers and Electrical Engineering*, Numero 39, pp 2638-2655.
- Quevauviller, P. (2012). Integration of research advances in modelling and monitoring in support of WFD river basin management planning in the context of climate change. *Science of the Total Environment*, 167-177.
- Ramalho R. (1983). *Tratamiento de aguas residuales*. Quevec: Editorial Reverte S.A.

- Rani D. (2013). Genetic Algorithms and Their Applications to Water Resources Systems. *Metaheuristics in Water, Geotechnical and Transport Engineering*, 43 - 78.
- RAS. (2000). *Reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico. RAS 2000. Título E. Tratamiento de Aguas residuales*. Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico.
- Ravazzani, G. (2011). Macroscopic cellular automata for groundwater modelling: A first approach. *Environmental Modelling & Software*, Volumen 26, pp 634-643.
- Revollo D. (2010). Análisis de las economías de escala y alcance en los servicios de acueducto y alcantarillado en Colombia. *Desarrollo y sociedad*, 145- 182.
- Rich L.G. (1973). *Environmental systems engineering*. USA: Mc Graw Hill.
- Rinaldi, P. (2007). Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Numero 15, pp 315-327.
- Rios, N. (2008). *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos*. Costa Rica: CATIE. Serie Técnica. Boletín Técnico. No 30.
- Rios, S. (1989). *Proceso de decisión multicriterio*. Madrid España: Eudema.
- Riquelme, J. (2006). Minería de datos: concepciones y tendencias. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, Volumen 29, pp 11-18.
- Rivas, M. (2002). La planificación ambiental estratégica en los instrumentos de Ordenamiento Territorial. Caso de estudio: el Plan regulador Intercomunal del Alto Aconcagua (PRIAA). Provincias de San Felipe y Los Andes, V región, Valparaíso, Chile. *Revista Proyección Nº 2. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional de Cuyo.*, 32 - 44.
- Rodríguez J.P. (2009). Selección técnico económico del sistema de depuración de aguas residuales. Aplicando la evaluación de la descontaminación hídrica. *Tecnología del agua*, 22 - 21.
- Rodríguez, J. (2015). Analysis of the investment costs in municipal wastewater treatment plants in Cundinamarca. *Dyna*, 230 - 238.
- Rodríguez, J. (2015). PAHICMETRIA: un modelo de métrica en la planificación ambiental hídrica. *REVISTA TECNURA*, 25 - 35.
- Rodríguez, J. (2015). Software engineering as a vehicle for water resources environmental planning. *REVISTA TECNURA*, 143 - 151.
- Rodríguez, J. (2015). Theoretical similitude of the aerobic biological growth kinetics for the stabilization of organic matter in wastewater treatment. *Revista Tecnura*, 145 - 156.
- Rodríguez, J. P. (2009). Selección técnico económico del sistema de depuración de aguas residuales. Aplicando la evaluación de la descontaminación hídrica. *Tecnología del agua*, 22 - 21.
- Rojas R. (2002). Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. "GESTIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES" (págs. 8 - 15). LIMA: OPS.
- Ross, T. (2010). *Fuzzy Logic, with engineering applications*. New Mexico, USA: WILEY. Third edition.

- Ruiz, M. (2009). Variabilidad estacional e interanual del viento en los datos del reanálisis NCEP/NCAR en la cuenca Colombia, mar Caribe. *Avances en recursos hidráulicos*, 7 - 20. Numero 20. Junio - Octubre.
- Ruiz, M. (2009). Variabilidad estacional e interanual del viento en los datos del reanálisis NCEP/NCAR en la cuenca Colombia, Mar Caribe. . *Avances en recursos hidráulicos*. , 7 - 20.
- Ruiz, R. (2006). Presentación: minería de datos. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, Numero 29, pp 7-9.
- Sacerdoti, J. (2003). *Transformada Z*. Buenos Aires, Argentina.: Universidad de Buenos Aires. .
- Safavi, H. (2015). Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. *Journal of Hydrology*, 773 - 789.
- Salas D. (2007). Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la región. *Scientia et Technica*, 591 - 596.
- Sari, H. (2013). Fuzzy-logic modeling of Fenton's strong chemical oxidation process treating three types of landfill leachates. *Environ. Sci. Pollut*, Numero 20, pp 4235-4253.
- Sarkar, A. (2015). River Water Quality Modelling using Artificial Neural Network Technique. *Aquatic Procedia*, Numero 4, pp 1070 - 1077.
- Sarkar, C. (2006). Qualidex- a new software for generating water quality indice. *Environmental Monitoring and Assessment* (, 201 - 231. Volume 119. Aug. No 1 - 3.
- Sarmiento G. (1992). *Documento de manejo de aguas residuales urbanas y tasas retributivas*. Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico. Seminario internacional sobre tratamiento de aguas residuales.
- Schneider, M. (2011). La gestión integrada de los recursos hídricos: el aporte de la Universidad a su proceso de construcción. En J. C. Bertoni, *Tecnología, investigación y gestión* (págs. 67 -71). Córdoba, Argentina: Centro de estudios y tecnología del agua. Universidad Nacional de Córdoba. .
- Schweickardt, G. (2014). METAHEURÍSTICAS MULTIOBJETIVO CARDUMEN DE PECES ARTIFICIALES FAFS) Y OPTIMIZACIÓN EVOLUCIONARIA POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS CON TOPOLOGÍA ESTOCÁSTICA GLOBAL INDIVIDUAL (FEPSO GIST). PARTE I: ANTECEDENTES Y DESARROLLOS TEÓRICOS. *Lámpsakos*, Volumen 12, Julio - Diciembre, pp 13-22.
- Sheila, S. (2004). *Earthly Politics: Local and Global in Environmental Governance (Politics, Science, and the Environment)*. USA.
- Sheila, S. (2004). *Earthly Politics: Local and Global in Environmental Governance (Politics, Science, and the Environment)*. USA.
- Singhirunnusorn W. (2010). A critical analysis of economic factors for diverse wastewater treatment process: case studies in thailand. *Sustain Environmental*, 263 - 268.
- Soo, T. (2011). Self-Organizing Maps applied to ecological sciences. *Ecological Informatics*, Numero 6, pp 50 - 61.
- Sorensen, P. (2010). Conscious worst case definition for risk assessment, part II A methodological case study for pesticide risk assessment. *Science of the Total Environment*, Numero 408, pp 3860-3870.

- Southworth, J. (2004). Land cover change and landscape fragmentation—comparing the utility of continuous and discrete analyses for a western Honduras region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 185 - 205. Volume 101.
- Southworth, J. (2004). Land cover change and landscape fragmentation—comparing the utility of continuous and discrete analyses for a western Honduras region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 185 - 205.
- Sujual, I. (2015). Adverse Impacts of Poor Wastewater Management Practices on Water Quality in Gebeng Industrial Area, Pahang, Malaysia. *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 286 - 289. Volume 9. No 5.
- Sujual, I. (2015). Adverse Impacts of Poor Wastewater Management Practices on Water Quality in Gebeng Industrial Area, Pahang, Malaysia . *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 286 - 289.
- Szesz, A. (2016). Embedded system in Arduino platform with Fuzzy control to support the grain aeration decision. *Ciência Rural*, Volumen 46, numero 11, pp 1917-1923.
- Tan R.R. (2008). A methodology for the design of efficient resource conservation networks using adaptive swarm intelligence. *Journal of Cleaner Production*, 822 - 832.
- Tsagarakis K.P. (2003). Application of cost criteria for selection of municipal wastewater treatment systems. *Water, air and soil pollution*, 187 - 210.
- USEPA. (1978). *Construction cost for municipal wastewater treatment plants 1973 - 1977*. USA: EPA/430/977014.
- USEPA. (1980). *Construction cost for municipal wastewater treatment plants 1973 - 1978*. USA: EPA/430/980003.
- Valenzuela L.C. (2006). Evaluación económica y metodología de minimización de costos para proyectos de sistemas de agua potable. *Desarrollo y sociedad*, 147- 171.
- Van Haandel A.C. (1994). *Anaerobic Sewage Treatment. A practical guide for regions with a hot climate*. Inglaterra: John Wiley and sons.
- Vega, L. (2001). *Gestión Ambiental Sistémica*. Bogotá: SIGMA LTDA.
- Vega, L. (2002). *POLÍTICAS PÚBLICAS HACIA EL DESARROLLO SOSTENIBLE Y POLÍTICA AMBIENTAL HACIA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DEL DESARROLLO1*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación (DNP).
- Vela, J. (2013). Características y funciones para marcas de lugar a partir de un método Delphi. *Revista Latina de Comunicación Social*, Numero 068, pp 656-675.
- Vergel G. (2010). *Metodología. Un manual para la elaboración de diseños y proyectos de investigación. Compilación y ampliación temática*. Barranquilla: Publicaciones Corporación UNICOSTA.
- Vergel, G. (2010). *Metodología: un manual para la elaboración de proyectos de investigación*. Barranquilla.: Unicosta.
- Vieira S.M. (1992). Sewage treatment by UASB reactor. Operation results and recommendations for design and utilization. *Wat. Sci. Tech.*, 143–157.

- Villaseñor J. (2001). *Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales*. Castilla: Universidad de Castilla.
- Villavicencio, A. (2011). Planificación de recursos hídricos en zonas de secano usando un modelo de optimización no lineal. *Obras y proyectos*, 73 - 80. Volume 10.
- Von Sperling M. (1996). Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. *Water science and technology*, 156 - 180.
- Walpole, R. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México: Prantice Hall Hispanoamericana S.A.
- WEF. (1998). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. Manual of Practice nº8*,. New York: Am. Soc. Civ.Eng.
- Wernes, G. (1995). *"ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL EN CHILE*. Nuremberg, Alemania: INTEGRATION ENVIRONMENT & ENERGY / ECODEC.
- West D. (2011). An empirical analysis of neural network memory structures for basin water quality forecasting. *International Journal of Forecasting*, 777–803.
- Winter, G. (1994). *Blueprint for green management*. London: MsGraw Hill.
- Xie, M. (2010). *Integrated water resources management (IWRM) – introduction to principles and practices*. Nairobi: Africa Regional Workshop on IWRM.
- Yan, T. (2015). Administrative and market-based allocation mechanism for regional water resources planning. *Resources, Conservation and Recycling*, 156 - 173.
- Yañez F. (1995). *Lagunas de estabilización*. Lima: Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.
- Yisa, J. (2010). Analytical Studies on Water Quality Index of River Landzu. *American Journal of Applied Sciences*, 453 - 458. Volume 7. No 4.
- Zamora, A. (2011). *Ecuaciones diferenciales parciales*. Cuajimalpa, Mexico. : Universidad Autonoma Metropolitana. Departamento de Matematicas aplicadas y sistemas.
- Zarghami, M. (2007). Multi-criteria decision making for integrated urban water management. *Water Resources Management*, Volumen 22, numero 8, pp 1017-1029.
- Zeleny, M. (1982). *Multiple criteria decision making*. New York: Mc Graw Hill.
- Zhang Q.H. et al. (2010). Application of life cycle assessment for an evaluation of wastewater treatment and reuse project - case study of Xi An, China. *Bioresource technology*, 1421 - 1425.
- Zhang, X. (2008). *Water resources planning based on complex system dynamics: a case study of Tianjin city*. China: Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 13, 2328e2336.
- Zhang, Y. (2015). Planning of water resources management and pollution control for Heshui River watershed, China: A full credibility-constrained programming approach. *Science of the Total Environment*, 280 - 289.
- Zuñiga, R. (2012). Estudios de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. *Obras y proyectos*, 69 - 78. Volume 11.

## **8. ANEXOS.**

- a. Códigos de las técnicas computacionales desarrolladas.
- b. Artículos publicados.
- c. Ponencias publicadas.