



**UNIVERSIDAD  
DEL QUINDÍO**

**Uso de la teoría de redes para  
modelar la contaminación  
térmica de la subcuenca del río  
Quindío.**

**Manuel Alejandro Chaucanes López**

Universidad del Quindío  
Facultad de Educación, Programa de Licenciatura en Matemáticas  
Armenia(Q), Colombia  
2022

# Uso de la teoría de redes para modelar la contaminación térmica de la subcuenca del río Quindío.

Manuel Alejandro Chaucanes López

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de:  
**Licenciado en Matemáticas**

Director  
**MS.c Jorge Mario García Usuga**

Área de profundización: Matemáticas aplicadas  
Trabajo de grado bajo la modalidad de Trabajo de Investigación  
Grupo de Investigación: Grupo de Estudio y Desarrollo de Software  
(GEDES)

Universidad del Quindío  
Facultad de ciencias de la Educación  
Programa de Licenciatura en Matemáticas  
Armenia(Q), Colombia  
2022

*Para mis padres Eduardo y Stella Quienes con su amor, ayuda, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, valentía y humildad, de no temer a las adversidades porque Dios está conmigo siempre regalándome el milagro de tener a mis amados padres.*

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
<b>2. Justificación</b>	<b>10</b>
<b>3. Planteamiento del problema</b>	<b>16</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>18</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	18
4.2. Objetivos específicos . . . . .	18
<b>5. Estado del Arte</b>	<b>19</b>
<b>6. Marco Teorico</b>	<b>24</b>
6.1. Hidrología . . . . .	24
6.1.1. Clasificación de los cuerpos de agua . . . . .	25
6.1.2. Tipos de Rios . . . . .	27
6.1.3. Clasificación de los Rios según su geomorfología . . . . .	27
6.2. Caracterización de la Subcuenca río Quindío . . . . .	29
6.2.1. Localización y extensión . . . . .	29
6.2.2. Economía . . . . .	32
6.2.3. Distribución de la cuenca . . . . .	32
6.3. Temperatura del agua . . . . .	34
6.3.1. Contaminación Térmica . . . . .	36
6.3.2. Causas del aumento de la temperatura del agua . . . . .	37
6.3.3. Concentraciones establecidas por guías internacionales . . . . .	40
6.4. Teoría de Redes . . . . .	41
6.4.1. Antecedentes históricos . . . . .	42
6.4.2. Estructura de una red . . . . .	43
6.4.3. Propiedades de una red . . . . .	46
6.5. Software necesarios . . . . .	47
6.5.1. Ghephi . . . . .	47
6.5.2. Python . . . . .	48
6.5.3. Utilización del Software . . . . .	49
6.6. Regresión No Lineal . . . . .	52
6.6.1. Ventajas de la regresión no lineal . . . . .	53

## ÍNDICE

---

<b>7. Resultados</b>	<b>62</b>
7.1. Toma de la temperatura del agua . . . . .	62
7.2. Aplicación del modelo . . . . .	64
7.3. Ecuación del modelo . . . . .	65
7.4. Zonas del río Quindío . . . . .	67
7.4.1. Temperatura promedio del río Roble, Espejo y San Juan	68
<b>8. Conclusiones</b>	<b>72</b>
<b>9. Anexos</b>	<b>74</b>
9.1. Código fuente de el software para la simulación . . . . .	78
9.1.1. Programa para generar el modelo de regresión Logística	78
9.1.2. Programa para generar la simulación en la red . . . . .	80

### **Resumen**

La contaminación térmica, se describe como una forma de deterioro del agua por la presencia de actividad anormal en los cuerpos de agua, específicamente al introducir algún material en el agua o inducir condiciones sobre el mismo, estas alteraciones tienen su origen en fuentes industriales, incluyendo el agua de refrigeración vertida por las estaciones generadoras de energía. Es muy importante entender el comportamiento térmico de los ríos y los procesos de intercambio de calor relacionados, para lo cual se hará necesario del desarrollo de un modelo matemático con teoría de redes y la utilización de una regresión no lineal de tipo logístico de tipo Gompertz, Weibull, de tres parámetros; donde se obtendrá una estimación de las temperaturas de los arroyos en función de las temperatura del aire, se utilizara el software Gephi con el que se construirá la red hidrológica, y la herramienta Python para generar el código de la función. Se obtuvieron 3340 datos de temperatura aire/agua, obtenidos por la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) de 7 estaciones de medicion, para el periodo comprendido entre enero de 2014 y diciembre de 2015, también se tomaron datos in situ en la subcuenta del rio Quindío en horas entre las 11:00 a.m. y las 2:00 p.m., estas mediciones de la cuenca se tomaron para un periodo comprendido entre enero y mayo de 2020. Los municipios en los que se proyecta un mayor crecimiento en la demanda de agua son Armenia con un incremento de 71, 27l/s, La Tebaida con 41, 22l/s y Calarcá 25, 23l/s, principalmente para uso doméstico 52, 95l/s, 22, 28l/s y 34, 28l/s, respectivamente y en menor proporción para el uso pecuario, lo que hace que el aumento de temperatura este por encima de los 20°C en zonas urbanas del municipio de Armenia Y Calarcá.

Palabras clave: Temperatura, contaminación térmica, modelo, teoría de redes, regresión no lineal, logístico, cuerpos de agua, alteraciones, estimación,

### 1. Introducción

El agua es considerada un elemento vital y determinante en la dinámica de las sociedades humanas y de todas las comunidades biológicas. Además hace parte de la constitución estructural de la biosfera y fundamental en los procesos productivos naturales, como también, determinante en el desarrollo de las actividades socioeconómicas en espacio y tiempo de una región o localidad[1].

La contaminación térmica o polución térmica, se describe como una forma de deterioro del agua por la presencia de actividad anormal de naturaleza diversa, específicamente el introducir algún material o inducir condiciones sobre el agua ya sea de forma directa o indirecta, implica una alteración perjudicial de la calidad del agua en relación a sus usos posteriores o sus servicios ambientales[2], esto ocasiona un incremento o disminución sostenido en la temperatura, estos elementos pueden ser químicos y físicos que pueden alterar las propiedades del medio ambiente e incidir en su delicado balance bioquímico[3].

El calor tiene un efecto catalizador sobre las reacciones químicas en el agua, de tal forma que un calentamiento anormal del agua puede cambiar el mecanismo de las reacciones, haciendo que estas ocurran en un menor tiempo cambiando el estado normal del líquido, en consecuencia de esto se presenta un declive de la vegetación acuática, esto es debido a una variedad de factores estresantes que se han observado en todo el mundo, algunos de esos factores son la contaminación química, la eutrofización o el aumento de la temperatura en el agua, los cuales podrían ser variables explicativas de una disminución en la vegetación acuática[4].

El cambio de la temperatura del agua también está relacionada con el flujo del aire ya que este tiene una temperatura mucho más alta que el agua, lo que provoca una transferencia combinada de calor acompañada de la evaporación del agua en la corriente del aire, tales estudios fueron realizados por Chilton-Colburn para una temperatura del aire de  $200^{\circ}C$ , velocidades de aire de  $1-10m/s$  y temperaturas del agua de  $10 - 90^{\circ}C$ [5]. Este es uno de los muchos problemas de la contaminación térmica, causas de esto son los elementos industriales o tecnológicos que introducen calor al ambiente de manera descontrolada, como lo son vertimientos de aguas industriales, la

## 1 INTRODUCCIÓN

---

deforestación y erosión de los suelos. Las consecuencias de estos fenómenos llevan a una reducción del oxígeno en el agua, haciéndola menos idónea para la vida, y sofocando especies animales, los niveles elevados de la temperatura del agua también pueden acelerar ciertos procesos reproductivos a la par que también entorpecen otros, ocasionando que algunas especies proliferen desordenadamente y otras, en cambio, disminuyan su número[6].

Los principales efectos que produce el agua contaminada en el medio ambiente son: contaminación microbiológica del agua, con la propagación de enfermedades transmitidas por el agua lo que causa el aumento de tamaño de las epidemias; pérdida de los ecosistemas acuáticos; riesgo de infecciones crónicas en el hombre, asociadas a la contaminación química; pérdida de la capacidad productiva en suelos regados, a causa de procesos de salinización[7]. También se produce la pérdida de la reserva de proteínas de los peces con el aumento de la temperatura de  $11 - 18^{\circ}C$  lo que somete a los peces a un estrés crónico que restringe el crecimiento y suprime la inmunidad innata[8]. La modificación del cauce de los ríos que drenan al mar y la alteración del flujo del agua que escurre en dichos ríos, a causa de la construcción de represas, extracción de áridos o encauzamientos, también han afectado los ecosistemas marinos. Esto se debe a la reducción y/o al incremento de nutrientes, sedimentos y contaminantes, y a sus efectos en los patrones de movimiento y circulación del agua. Estas alteraciones afectan principalmente los estuarios, golfos y otros cuerpos acuáticos que tienen limitado movimiento y renovación, se puede considerar que casi todos los usos pueden contaminar el recurso y convertirlo en no disponible para otros aspectos de la vida[10].

El agua es una parte fundamental para la existencia del ser humano, su uso nos permite realizar actividades que son esenciales para el desarrollo de una sociedad; ya sea en uso de las diferentes bebidas que consume el hombre, como en la preparación de diversos alimentos y el uso del líquido en las fábricas donde se procesa la comida. Sin este recurso es imposible que la vida prevalezca como la conocemos. En el planeta, un 97,5% del agua está en mares y océanos. Sólo un 2,5% es, por tanto, agua dulce, y de todo el agua dulce existente el 80% está congelada en casquetes polares y glaciares y otro 19% bajo tierra. Así, sólo el 1% de agua dulce está disponible en la superficie. Y de este 1% el ser humano consume directamente o indirectamente alrededor de un 54% del agua dulce, ya sea para mantener

## 1 INTRODUCCIÓN

---

la fauna y la flora, para el transporte de bienes (barcos) o para la pesca.[2].

El presente trabajo, describe las características de una problemática que afecta a la población en general, amenazada por los cambios fluctuantes de la temperatura en los cuerpos de agua y las consecuencias derivadas de la contaminación térmica.

Se tendrá en cuenta para esta investigación la información brindada por la corporación autónoma regional del Quindío (CRQ), el Agustín Codazzi y la documentación de las diferentes investigaciones hechas en torno a la contaminación de los cuerpos de agua.

Se desarrollará un modelo de regresión no lineal de tipo logístico, con el cual podremos tener una representación aproximada de la realidad en términos matemáticos, la función obtenida contara con tres parámetros y una variable de temperatura del aire. Esta función nos permitirá con los datos suministrados por la relación de temperatura agua/aire de distintos puntos a lo largo de la cuenca rio Quindío, tener una estimación de la temperatura del agua de ríos y quebradas. El método de regresión no lineal muestra varias ventajas sobre las regresiones lineales simples, es más preciso pero sigue siendo simple.

### 2. Justificación

El agua de los ríos es un recurso muy valioso para el desarrollo de la vida, esta puede llegar a contaminarse muy fácilmente ya sea por intervención humana o por fenómenos naturales. Luego de estar contaminada, la calidad del agua dulce puede resultar muy difícil y costosa de restaurarla a su estado natural[11], el agua almacenada en reservorios y lagos, junto con el agua que fluye permanentemente en los arroyos, está sujeta a un fuerte estrés hídrico, esto sucede cuando la demanda de agua es más grande que la cantidad disponible durante un período determinado de tiempo o cuando su uso se ve restringido por su baja calidad, definición dada por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y debido a que es utilizada en diversas formas como lo son: el consumo humano, la agricultura, la industria y la recreación, en algunos de estos contextos el agua puede llegar a contaminarse con demasiada facilidad, el resultado es un deterioro de los recursos de agua dulce en términos de cantidad ya sea por acuíferos sobreexplotados, ríos secos o lagos contaminados.

Las variaciones estacionales de la temperatura del agua son determinantes para la distribución de las especies acuáticas, es muy importante tener una buena comprensión del régimen térmico de los ríos para la gestión efectiva de la pesca, así como para la realización de evaluaciones de impacto ambiental, además de la calidad del agua y la distribución de las especies acuáticas en el entorno de un río. Se han formulado numerosas predicciones sobre la disponibilidad futura del pescado a nivel mundial, resumidos en la *Figura 1* y en consecuencia, el calor en el agua acelera la actividad metabólica de los peces lo que lleva a que consumen más alimentos en menos tiempo y reducen los recursos del entorno, con la consecuente disminución de las poblaciones de diferentes especies acuáticas, es evidente que la demanda de pescado ha aumentado significativamente con el tiempo, esta demanda ha variado según los continentes y ha estado relacionada con los pronósticos de crecimiento de la población[14]. El agua dulce y salada es uno de los recursos fundamentales sobre los que se basa el desarrollo de la sociedad, por lo que hay diversos factores que están implicados en el cambio de temperatura de un cuerpo de agua como lo son: algunas obras construidas por el ser humano denominadas intervenciones antropogénicas, que suelen ser viviendas, ciudades, campos de cultivo; obras para riego y vías de comunicación[13]. A medida que la temperatura del clima se ve alterado, también lo hace el agua y las

## 2 JUSTIFICACIÓN

---

implicaciones en los seres acuáticos y en consecuencia en la demandad de pescado requerida por el hombre.

**Proyecciones de la demanda de pescado comestible en relación con los pronósticos de crecimiento de la población**

Continente	Población ( x 10 <sup>3</sup> )		Suministro de pescado (2001)		Demanda en 2020 (toneladas) <sup>d</sup>
	2005 <sup>a</sup>	2020 <sup>a</sup>	Total (toneladas) <sup>b</sup>	Per cápita (kg) <sup>c</sup>	
África	905 936	1 228 276	7 066 301	7,8	9 580 553
Asia	2 589 571	3 129 852	36 512 951	14,1	44 130 913
China	1 315 844	1 423 939	33 685 606	25,6	36 452 606
Europa	728 389	714 959	14 422 102	19,8	14 156 838
América Latina y el Caribe	561 346	666 955	4 939 845	18,8	5 869 204
América del Norte	330 608	375 000	5 719 518	17,3	6 487 500
Oceanía	33 056	38 909	760 288	23,0	894 907
Todo el mundo	6 464 750	7 577 889	105 375 425	16,3	123 519 591

Figura 1: a. Naciones Unidas; b. población en 2005 x suministro per cápita en 2001; c. FAO; d. población en 2020 x suministro per cápita en 2001.[14]

El factor humano es siempre el causante de muchos desastres dentro de la cuenca, ya que esta es sobreexplotada, quitándole recursos o desnudándola de vegetación y trayendo inundaciones en las partes bajas. Pero el mayor de los males es la construcción de viviendas, urbanizaciones y poblaciones enteras en zonas inundables, sobre todo, en las llanuras aluviales de las cuencas de muchos ríos[2].

El agua entonces, debe ser empleada teniendo en cuenta las metas económicas y sociales de la región, pero sin comprometer la estabilidad de los ecosistemas ni perjudicar la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus necesidades de agua; más en una zona donde el agua es un eje articulador de vital importancia. El agua constituye una parte esencial de todo ecosistema, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Una reducción del agua disponible ya sea en cantidad, en calidad, o en ambas, provoca efectos negativos graves sobre los ecosistemas[1].

Un promedio global en la superficie del planeta, describe un aumento de 1°C de la temperatura entre 1880 y 2015, influyendo esto en la calidad del agua para el consumo por parte de los seres humano, dificultando y desequilibrando aún más el acceso a este recurso vital en el mundo. Según

## 2 JUSTIFICACIÓN

---

diferentes previsiones basadas en el crecimiento humano se espera que en el 2050 la demanda de agua haya aumentado un 55 %, pero el incremento en el consumo de agua ha generado fuertes alteraciones en el régimen de los ríos, impactando negativamente en los ecosistemas fluviales y comprometiendo la sostenibilidad del recurso hídrico[16].

La contaminación térmica de los cuerpos de agua dulce a partir de la generación de energía (una de las principales causas de este tipo de contaminación), es provocada por las centrales eléctricas de vapor-eléctrico que emplean un sistemas de refrigeración de agua de río, donde la torre de refrigeración húmeda libera casi todo el calor absorbido durante el proceso de generación de energía mediante evaporación y se disipa en la atmósfera, este proceso de enfriamiento implica el rechazo directo del calor de nuevo en el cuerpo de agua, este proceso de enfriamiento puede conducir a un significativo aumento de la temperatura del agua[17]. La topografía o la ubicación geográfica también es importante, ya que influyen en las condiciones atmosféricas, otros factores son el flujo (corriente) y la profundidad del agua, la temperatura media del agua aumenta en una dirección descendente, es decir a medida que aumenta la corriente, haciendo que en aguas subterráneas la temperatura aumente[13].

Dentro de los factores humanos se encuentra la eliminación de la vegetación riparia, la erosión de la tierra a gran escala; el cultivo de vegetales, puede causar la contaminación de las aguas subterráneas, el carbono orgánico, los nutrientes y las sales inorgánicas influirían en el destino y el transporte de compuestos perfluorados en el agua subterránea[19]. El aumento de la turbidez, aumento de escorrentía de aguas fluviales, la alteración de la corriente morfológica y la descarga de agua fría provenientes de plantas eléctricas[20].

De igual forma, las plantas nucleares o termales, son otro ejemplo de la forma en como el hombre puede afectar los cuerpos de agua debido a la desmesurada industrialización. Uno de estos ejemplos es ilustrado por *Lyubimova*[25], donde, se muestra los efectos de una de las mayores plantas termales de Europa llamada *Permskaya TPP*; el trabajo indica que dicha planta, cambia la temperatura del río en aproximadamente  $8^{\circ}C$ , lo que afecta notoriamente la fauna y flora del estuario.

## 2 JUSTIFICACIÓN

---

La contaminación térmica proveniente de fuentes industriales, incluyendo el agua de refrigeración vertida por las estaciones generadoras de energía, también puede afectar negativamente a los recursos acuáticos mediante la reducción de la superficie disponible del hábitat, causando un impacto en muchas especies acuáticas (por ejemplo, bacterias, algas, vertebrados, etc)[17].

La temperatura es uno de los parámetros más importantes de la calidad de agua, esta puede afectar la química de la misma y las funciones de los organismos acuáticos y pueden influir en gran escala en la cantidad de oxígeno que se puede disolver en un río, también puede afectar la velocidad de fotosíntesis de las algas y otras plantas acuáticas, de igual manera afecta la velocidad metabólica de los organismos y la sensibilidad de estos a desechos tóxicos, parásitos y enfermedades; por último, un cambio en la temperatura puede llegar a interferir en la épocas de reproducción, migración y estivación de organismos acuáticos[26].

En Colombia, por medio del decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible (*decreto 1076 de 2015*), se encuentran compilados en un solo cuerpo normativo todos los decretos reglamentarios vigentes y expedidos hasta la fecha, que desarrollan las leyes en materia ambiental. Tomado como fuente principal el POMCA (*Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica*) del río La Vieja, el diagnóstico fue ajustado al departamento del Quindío en diferentes ámbitos como componentes físicos, bióticos, socioeconómicos, culturales y de riesgos, permitiendo la caracterización del territorio; para los usos del agua y residuos líquidos están reglamentados mediante los *decretos 1594 de 1984 y 3930 de 2010*, donde se establecen las normas de vertimiento a un cuerpo de agua.

La temperatura del agua es uno de los parámetros en la ecología que determina la salud general de los ecosistemas acuáticos [13]. Que influye en la tasa de crecimiento de organismos acuáticos, así como su distribución. La mayoría de los organismos tienen un rango específico de temperaturas que pueden tolerar. (*Cuadro 1*) Las variaciones estacionales y diarias de la temperatura del agua son muy importantes para la distribución de las especies acuáticas.

Cuando el agua se enfría a niveles anormalmente bajos, los invertebrados

## 2 JUSTIFICACIÓN

---

<b>Especie</b>	<b>Crecimiento</b>	<b>Máxima</b>	<b>Desove*</b>	<b>Supervivencia del embrión**</b>
Agalla azul	32 <sup>0</sup> C(90 <sup>0</sup> F)	35 <sup>0</sup> C(95 <sup>0</sup> F)	25 <sup>0</sup> C(77 <sup>0</sup> F)	34 <sup>0</sup> C(93 <sup>0</sup> F)
Carpa		21 <sup>0</sup> C(70 <sup>0</sup> F)	33 <sup>0</sup> C(91 <sup>0</sup> F)	
Pez gato del Canal	32 <sup>0</sup> C(90 <sup>0</sup> F)	35 <sup>0</sup> C(95 <sup>0</sup> F)	27 <sup>0</sup> C(81 <sup>0</sup> F)	29 <sup>0</sup> C(84 <sup>0</sup> F)
Boca Grande Bajo	32 <sup>0</sup> C(90 <sup>0</sup> F)	34 <sup>0</sup> C(93 <sup>0</sup> F)	21 <sup>0</sup> C(70 <sup>0</sup> F)	27 <sup>0</sup> C(81 <sup>0</sup> F)
Trucha	19 <sup>0</sup> C(66 <sup>0</sup> F)	24 <sup>0</sup> C(75 <sup>0</sup> F)	9 <sup>0</sup> C(48 <sup>0</sup> F)	13 <sup>0</sup> C(55 <sup>0</sup> F)
Salmon ojo de caletín	18 <sup>0</sup> C(64 <sup>0</sup> F)	22 <sup>0</sup> C(72 <sup>0</sup> F)	10 <sup>0</sup> C(50 <sup>0</sup> F)	13 <sup>0</sup> C(55 <sup>0</sup> F)

Cuadro 1: \*Temperaturas y valores óptimos y medios para el desove de la especie. \*\*Temperatura máxima permisible para la incubación y desove para la especie.

pueden morir inmediatamente o crecer más lentamente; Es posible que no alcancen la madurez para reproducirse en verano y por lo tanto, los peces y otros animales que forman parte de la pirámide alimentaria se verán afectados. Para los peces, la temperatura más baja puede interrumpir el desove, aumentar la duración de los huevos para desarrollarse, afectar la supervivencia de las larvas, retardar el crecimiento, aumentar la vulnerabilidad a los depredadores y parásitos, permitiendo que las especies extrañas más tolerantes al frío tomen el control de la cadena alimenticia [28].

Aunque podrían mencionarse los mismos efectos generales del frío en el crecimiento y desarrollo de los anfibios, aparentemente existe un efecto positivo del agua más fría, se ha observado que los papilomas (tumores de la piel) en los tritones (familia de los anfibios) retroceden (dan marcha atrás) cuando los individuos se mantienen por más de dos meses en agua de tan solo 4<sup>0</sup>C, el llamado choque del frío o terapia de frío, definido por *Donaldson*, como una disminución aguda de la temperatura del ambiente que tiene el potencial de causar una rápida reducción de la temperatura corporal, que resulta en una cascada de respuestas fisiológicas y de comportamiento, en la naturaleza los peces expuestos al choque de frío son individuos altamente desfavorecidos, comportándose de manera anormal y exhibiendo cambios con respecto al sistema muscular, las funciones neurales, la expresión proteica, la osmorregulación y el equilibrio iónico. Obviamente, estos peces son capturados fácilmente por animales piscívoros y por los humanos a causa

## 2 JUSTIFICACIÓN

---

del choque del frío[28].

Este trabajo es importante ya que estudia la dinámica de la temperatura de los ríos de la subcuenca río Quindío, y cómo puede afectar esto a los cuerpos de agua, de tal forma que se pueda realizar una evaluación de impacto ambiental, para poder disponer de una gestión eficaz de la pesca. Es muy importante entender el comportamiento térmico de los ríos y los procesos de intercambio de calor relacionados, para lo cual se hará necesario del desarrollo de una simulación con teoría de redes y la utilización de una regresión no lineal de tipo logístico, con esto se espera tener un modelo que nos ayude a evaluar planes alternativos en el momento de predecir el impacto de un cambio de temperatura por la presencia de sólidos en los cuerpos de agua.

## 3. Planteamiento del problema

El Río Quindío es el principal cuerpo de agua del departamento del Quindío, su cauce principal nace en el nevado El Quindío (3780 m.s.n.m). El área hidrográfica del río Quindío se encuentra ubicada en la subzona hidrográfica 2612, según la clasificación del *Instituto Colombiano de Hidrología y Estudios Ambientales (IDEAM)* y está integrada por 5 municipios del Departamento del Quindío[24].

Al noreste del departamento; inicialmente recibe como afluentes principales las quebradas: Cárdenas, Peligrosa, La Honda, San Pacho, El Bosque, Santa Rita, Boquía y La Víbora. Éste hace un recorrido desde su inicio de 65.35 Km de longitud hasta su desembocadura a 1040 m.s.n.m[26].

En la unidad hidrográfica del río Quindío las principales demandas de agua se presentan en los diferentes sectores económicos, ya sea que se trate del sector primario como en el caso de la oferta agrícola, silvícola y pecuaria, del sector secundario o de transformación manufacturera incluido el sector energético o del sector terciario o de servicios. Así mismo, se incluye el agua utilizada en el consumo propio de la población y de los hogares, con fines de mantenimiento y de aseo de las viviendas, actividades tales como preparación de bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato; para satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios[27]. De esta se abastecen los municipios de Salento (*Quebradas Cruz Gorda, La Cristalina y Bolívar*), Armenia (*Cauce principal*) y Buenavista (*Quebrada La Picota*). Igualmente se proporciona agua para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (*PCH*) ubicadas a lo largo del cauce principal. El Campestre, Bayona, La Unión y El Bosque [26].

El río Quindío hasta su cuenca media recibe vertimientos directos en su cauce principal del corregimiento de Boquía localizado antes de la bocatoma que surte al acueducto del municipio de Armenia (*Bocatoma EPA*). Igualmente, recibe vertimientos indirectos de los municipios de Salento, Armenia, Calarcá y Córdoba, a través de las quebradas El Mudo, La Florida, El Cafetero (*conocido también como San Nicolás*), El Pescador y ríos Santo Domingo y Verde respectivamente, el sector industrial que se ubica en la cuenca del río Quindío y que produce mayores afectaciones sobre el recurso,

### 3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

está compuesto por las curtiembres del sector La María y otras empresas.

La temperatura del agua tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos procesos que en ella se realizan, de forma que un aumento de la temperatura modifica la solubilidad de las sustancias, aumentando la de los sólidos disueltos y disminuyendo la de los gases. La actividad biológica aproximadamente se duplica cada diez grados (ley del Q10), aunque superado un cierto valor característico de cada especie viva, tiene efectos letales para los organismos [28]. Un aumento anormal (por causas no climáticas) de la temperatura del agua, suele tener su origen en el vertido de aguas utilizadas en procesos industriales de intercambio de calor. La temperatura se determina mediante termometría realizada “in situ”.

Se presenta una tendencia creciente de la variable temperatura relacionada directamente con la altura sobre el nivel del mar, lo que hace que vaya en aumento hacia límites con el Valle del Cauca. En general hay un incremento de la temperatura en la cuenca media del río Quindío, específicamente entre el caserío La María y antes del retorno de agua de las *PCH* La Unión (kilómetro 25), donde se halla localizada la zona industrial del municipio y reducción de la oferta hídrica por parte de las captaciones de agua para las pequeñas centrales hidroeléctricas[26].

La temperatura del agua está relacionada con la temperatura atmosférica, pero influyen igualmente otros factores tales como la altitud, el espesor y duración de la cubierta nival, el deshielo, etc. Se trata de una variable fundamental en el periodo vegetativo, la concentración de oxígeno disuelto en el agua, la emergencia de fases larvarias acuáticas de insectos, etc. lo que nos plantea la pregunta: ¿Cómo hacer para identificar las variaciones de temperatura de la cuenca río Quindío en términos matemáticos, utilizando un método sencillo y de fácil aplicación, con pocos parámetros, en donde podamos modelar la temperatura del agua en relación con la temperatura del aire?. Esta herramienta nos permitirá comprender en profundidad algunos aspectos relevantes del fenómeno a estudiar, y de tal modo hacer una predicción sobre el comportamiento de la temperatura en el agua.

## 4. Objetivos

### 4.1. Objetivo general

Desarrollar una simulación del comportamiento de la temperatura del agua de la cuenca del río Quindío por medio de la utilización de teoría de redes y una regresión no lineal de tipo logístico.

### 4.2. Objetivos específicos

- Elaborar la red de la cuenca del río Quindío utilizando la información de la CRQ y el instituto Agustín Codazzi.
- Describir las características de la cuenca río Quindío, ubicación, la población, zonas industriales, afluentes.
- Determinar el tipo de herramienta que se puede ajustar para la implementación del modelo e identificar dicho modelo en el dominio específico del río Quindío.
- Implementar el modelo para realizar la simulación teniendo en cuenta la red y una regresión no lineal de tipo logístico
- Presentar los resultados obtenidos en la implementación del modelo y compararlos con los datos obtenidos por la CRQ.

## 5. Estado del Arte

De la superficie del planeta tierra el 70 % esta cubierta de agua[18], el restante 30 % es masa continental, de esta cantidad total, el 97.5 % es agua salada y se distribuye entre los océanos, mientras que el restante 2.5 % 35 millones de  $km^3$  es agua dulce distribuida: a nivel superficial en forma de ríos y arroyos, a nivel subterráneo en forma de acuíferos naturales, y en forma de hielo en los polos y cimas de las montañas[9]. Esta disponibilidad del agua *Figura 2* muestra como esta distribuida el agua dulce en la tierra. Los mares absorben actualmente tanto  $CO_2$  generado por actividades humanas (las industrias), por medio de los ríos que desembocan en los océanos, provocando que la química y las temperaturas de las aguas marinas llegan a tener cambios que pueden poner en peligro a los organismos que lo habitan. Las fluctuaciones de temperatura del agua pueden llegar a ocurrir naturalmente o como resultado de perturbaciones antropogénicas como la contaminación térmica, la deforestación y el cambio climático. Por ejemplo, desde hace mucho tiempo la deforestación ha sido identificada como una importante fuente de perturbación al régimen térmico de los ríos [13].

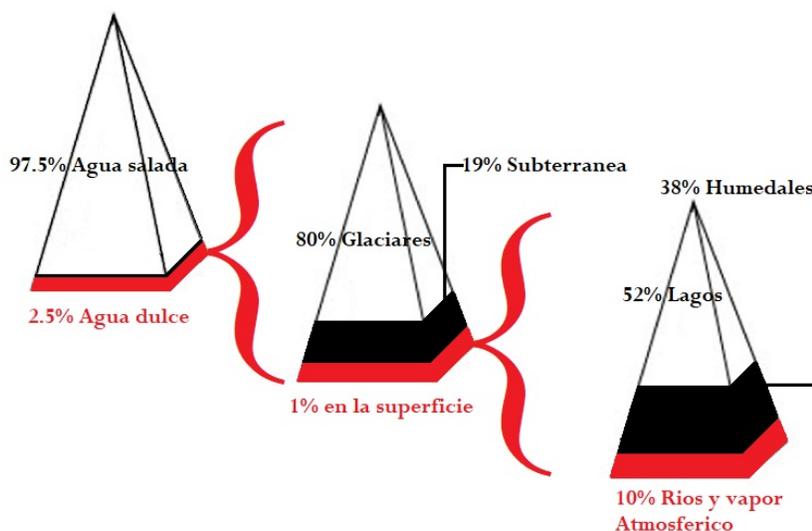


Figura 2: Distribución del agua, Revista Química Viva[15]

Estas interacciones dinámicas entre el cambio climático y los recursos de agua dulce en la tierra están estrechamente vinculadas a la disponibilidad

de agua de buena calidad para el consumo humano, que es de un 0,5 % que equivale al agua subterránea o superficial. En la Tierra habitan actualmente 6.000 millones de personas, de las cuales, cerca del 20 % viven en países que carecen de este vital líquido, y en los últimos años, el cambio climático ha sido identificado como una importante fuente de perturbación en una escala global [13].

Aunque sólo el 0,007 % de toda el agua del planeta tierra está disponible para el consumo humano, la distribución de este líquido en su forma potable es muy desigual, ya que diez países concentran más de la mitad de las reservas de agua dulce del mundo[12]. El segundo país latinoamericano de esta lista que se encuentra en la posición número 6 de mayor concentración de agua dulce es Colombia, que con  $2.132km^3$  de agua está también entre los lugares con mayores recursos acuáticos por persona, casi  $46.000m^3$  de agua, el Amazonas y sus afluentes son los responsables de la mayor parte del superávit hídrico del país, donde cerca del 70 % de la población está asentada en las vertientes del Caribe, siendo los ríos Cauca y Magdalena, los más representativos; esta situación ha conllevado a que estos ríos sean las dos arterias fluviales más importantes del país, y por ende, estén recibiendo de forma directa e indirecta las aguas residuales, prácticamente sin tratar de casi 15 millones de personas[23].

El autor Daniel Caissie[13] en su obra titulada *el régimen térmico de los ríos del 2006*, describe a la contaminación térmica de las masas de agua como una consecuencia inevitable de la explotación de las centrales térmicas o nucleares, este proceso modifica la temperatura del medio ambiente de manera perjudicial, ya sea que se trate tanto de un aumento como de una disminución de la temperatura, lo que puede afectar negativamente a la calidad del aire, del agua y también a los seres vivos, debido a la elevada inercia térmica del agua, la convierte en un elemento idóneo para almacenar el calor, este hecho es utilizado por las centrales térmicas, ya que no convierten toda la energía química en electricidad y liberan el resto en forma de calor, por lo que necesitan de un sistema de refrigeración. Sin embargo, antes de descargar esta agua a elevadas temperaturas en los ríos y mares, la hacen pasar por una torre de evaporación que reduce parte de esta temperatura, este proceso altera algunas de las características fisicoquímicas del agua que ingresa a los cuerpos de agua, por este motivo las centrales se sitúan en la proximidad de los ríos para minimizar los efectos perjudiciales de las

centrales térmicas; de igual forma se debe evaluar la naturaleza de las zonas peligrosas, el método más eficaz para la solución de estos problemas se basa en el experimento computacional; los primeros estudios de la temperatura del agua del río se centraron principalmente en la observación de uso del hábitat y el impacto que causan las altas temperaturas del agua en los salmónidos y sobre los factores responsables de los procesos térmicos de un río. Después de estos estudios enunciados anteriormente y en su mayoría descriptivos, la investigación se centró en el desarrollo de modelos de temperatura del agua, que más tarde se clasificaron en tres grupos distintos: modelos deterministas, de regresión y modelos estocásticos, los modelos deterministas emplean un enfoque de balance energético para predecir la temperatura del agua de río, mientras que los dos modelos de regresión y los modelos estocásticos se basan principalmente en los datos de temperatura del aire para predecir la temperatura del agua del río[13].

Cuando se utilizan modelos de regresión simples, es importante darse cuenta de que las diferentes escalas de tiempo desarrollaran diferencias en las relaciones de temperatura del agua (es decir, diferentes pendientes e intersecciones). Los estudios han demostrado que a medida que aumenta la escala de tiempo (diaria, semanal, mensual y anualmente), la pendiente de la recta de regresión de agua en la temperatura del aire aumenta generalmente con una intercepción decreciente.

De igual forma Caissie[13] hace una referencia de como los modelos de regresión múltiple se han usado para predecir las temperaturas del agua de río, los cuales hacen uso de variables explicativas distintas de la temperatura del aire, tales como la descarga del río, los datos de tiempo de espera, etc; y se incluyen a menudo un conjunto de parámetros, como máximo, mínimo y la media de la temperatura del aire en el día presente y precedente, así como también de descarga, esta técnica de modelado estocástico a menudo implica la separación de la serie de tiempo y la temperatura del agua en dos componentes, el componente anual a largo plazo (ciclo anual) y el componente a corto plazo. El componente anual representa el cambio en la temperatura del agua sobre una base estacional *Figura 3* y puede ser representado por una serie de Fourier o una función sinusoidal, el componente de corto plazo representa la salida de la temperatura del agua del componente anual como tal, este es el componente que está siendo modelado para predecir las temperaturas del agua a partir de datos de temperatura del aire y análisis

de series de tiempo.

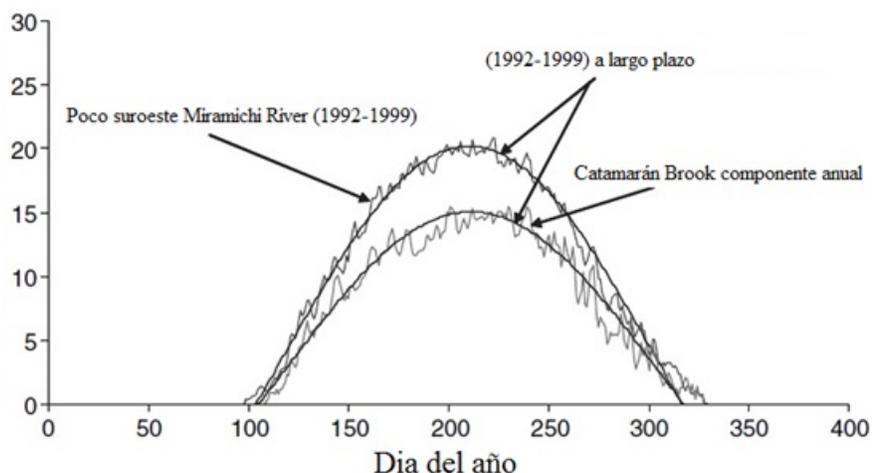


Figura 3: componente a largo plazo anual (ciclo anual) en las temperaturas del agua en Catamarán Brook y el suroeste Miramichi River Little (New Brunswick, Canadá)[13].

Los modelos deterministas han sido ampliamente aplicados en una variedad de problemas, por ejemplo, al llevar a cabo estudios de impacto tales como la contaminación térmica de afluentes llevado a cabo por las centrales eléctricas o liberaciones de agua caliente en las corriente de los embalses, estos modelos se adaptan mejor porque consideran los diferentes flujos de energía y zonas de mezcla dentro del río. El objetivo de la modelización determinista es cuantificar la energía total de reflujos experimentada por el río y los cambios de la temperatura del agua para luego ajustarla al total, el estudios de modelos tempranos se han basado en la cuantificación de los flujos de energía en la superficie aire / agua para predecir las temperaturas del agua de río.

los estudios realizados por Caissie muestran un aumento de  $6^{\circ}C$  en la temperatura máxima diaria del agua en el arroyo Salmon (Oregon), mientras que los incrementos de más de  $8^{\circ}C$  (1969 a 1989) fueron reportados en el arroyo de *Steamboat* (Hostetler, 1991), mostraron resultados similares (un aumento de  $7^{\circ}C$ ) y se calcula un período de 15 años para una recuperación gradual a la temperatura antes de la cosecha; La mayoría de los estudios han demostrado que se necesitan entre 5 y 15 años para que los ríos recuperen su régimen tras el rebrote de vegetación natural termal; de igual forma a mayor

temperatura del agua, muchas especies acuáticas cambian su comportamiento mediante la búsqueda de refugios térmicos lo que demostraría que el hábitat térmico para peces de agua fría podría reducirse en un 36 %, en consecuencia de un cambio climático[13].

Para la estimación de las temperaturas de los arroyos en función de las variables climáticas, se han desarrollado anteriormente modelos de diferente complejidad y requisitos de entrada de datos, el método más complejo para calcular las temperaturas de las corrientes utiliza un modelo de transporte de dispersión / advección de calor completo, un segundo método incorpora sólo procesos de transferencia de superficie y utiliza el concepto de temperatura de equilibrio, y un tercer grupo de modelos utiliza funciones estacionales (a menudo sinusoidales) de la temperatura de la corriente con respecto al tiempo[13].

## 6. Marco Teorico

### 6.1. Hidrología

La hidrología es la ciencia natural que estudia las aguas terrestres, su origen, circulación y distribución en la superficie de nuestro planeta. Es necesaria una gestión responsable hacia la falta de información fiable sobre la cantidad y calidad del agua disponible y cómo varía con el tiempo y región. La hidrología es de importancia para todos los problemas que involucran el aprovechamiento del agua y su relación con el medio ambiente, incluido los seres vivos[29].

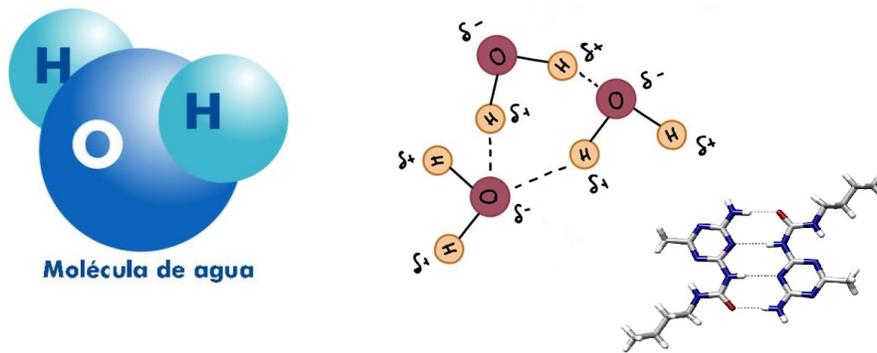


Figura 4: Molecula de Agua[32]

La hidrología tiene como objetivo fundamental la estimación del evento de diseño, cuando se proyecta la construcción de una obra hidráulica, es decir que puede ser la estimación de la avenida máxima para el vertedor de una presa o puede ser el caudal máximo que circula por un río para la instalación de un equipo de bombeo que se utilizará para el abastecimiento de agua en una población o la instalación de un sistema de regadíos. Puede ser también la estimación de la precipitación máxima, que se desea conocer para el establecimiento de un determinado cultivo o para la construcción de un estanque para la siembra de peces, etc[31].

### 6.1.1. Clasificación de los cuerpos de agua

Los cuerpos de agua presentan una estrecha interconexión, desde la atmósfera hasta los océanos mediante el ciclo hidrológico, y se clasifican en:

#### **Ríos**

Son cuerpos de agua denominados corrientes que se caracterizan por presentar flujo unidireccional con velocidades que oscilan entre 0,1 y 1m/s. Este flujo es altamente variable y está relacionado con las condiciones climáticas. Por esta razón, los ríos se consideran permanentemente mezclados y comúnmente, la calidad de agua se asocia al sentido del flujo[21]. Por tanto, este componente vectorial (río), permite la interconexión energética funcional entre los tres estados de la materia y el cuarto estado plasmático representado por la energía del sol[23].

#### **Lagos**

Extensión de agua dulce que se encuentra separada del mar, y que no tiene conexión con él, es decir, se diferencia de los ríos porque éstos delinear un curso que en general desemboca en mares. No es éste el caso de los lagos, que por otra parte, sí recibe en muchos casos el aporte de agua de los ríos, aunque en otros casos el mayor aporte de caudal de agua se deba a las lluvias que se producen sobre el lago mismo, estos sistemas acuáticos presentan velocidades relativamente bajas que oscilan entre 0,01 y 0,001m/s. Debido a esto, el agua permanece durante varios años en el sistema y la calidad del agua está determinada por el estado trófico y los períodos de estratificación[21].

#### **Laguna**

Es una acumulación de agua de una profundidad menor a la de un lago. Por lo general sus aguas son dulces y dan lugar a una variada flora y fauna tanto en sus inmediaciones terrestres como desde el punto de vista acuático. Se forman habitualmente por la existencia de un terreno hundido y la presencia de lluvias o la influencia de ríos, en algunos casos, las lagunas se forman de manera artificial, debido al actuar de la mano del hombre.

#### **Aguas subterráneas**

Aquellas masas de agua que se encuentran bajo la superficie del suelo. Forman parte del ciclo hidrológico, que se infiltra a través del agua de lluvia, de la nieve, del agua que se infiltra de las lagunas y los ríos, o en general, cuando

la capa superficial del suelo se encuentra saturada de agua, en este sistema el régimen de flujo es relativamente estable con respecto a la velocidad y dirección, el flujo presenta velocidades entre  $10^{-10}$  y  $10^{-3}m/s$ , estando regido por la porosidad y la permeabilidad del estrato[21].

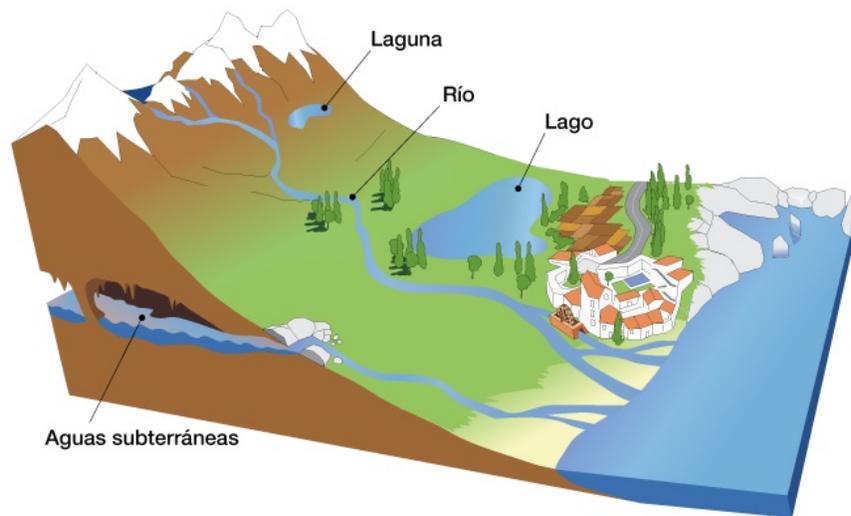


Figura 5: Clasificación de los cuerpos de agua[33]

Los ríos urbanos son ecosistemas complejos y dinámicos, donde el agua, la flora y la fauna son recursos que juegan un papel importante en el equilibrio y funcionalidad del ambiente. Estos cuerpos de agua deberían ser considerados hábitats preferenciales para la recreación de la sociedad, protección de la naturaleza y la biodiversidad, control climático y sobre todo, seguridad a la población frente a las amenazas naturales, tales como inundaciones y efectos del cambio climático[30].

En la superficie terrestre, el agua dulce puede viajar a muy diversas velocidades, normalmente por caminos ya establecidos (Young 1994) que pueden cambiar lentamente a través del tiempo. Estos caminos se combinan para formar redes de arroyos y ríos en las cuencas hidrológicas, de manera que el agua fluye por gravedad desde sus fuentes hasta el mar, existiendo así desde cuencas diminutas hasta cuencas gigantescas (tomado del Primer Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, 2003). Entonces,

los factores de los que depende la escorrentía superficial son básicamente Clima (precipitaciones, temperatura, etc.), Relieve, Vegetación y Geología (factor generador a su vez de los suelos en función también del clima).

### **6.1.2. Tipos de Rios**

Los tipos de ríos son varios y según su período de actividad se pueden clasificar en:

#### **Ríos perennes**

Localizados en zonas de abundantes precipitaciones. Debido a las lluvias, su caudal puede cambiar en grandes proporciones.

#### **Ríos estacionales**

Propios de las zonas con estaciones muy diferenciadas, es decir, un invierno húmedo y un verano seco.

#### **Ríos transitorios**

Son los de zonas desérticas, secas y áridas. Si bien en estas zonas las lluvias pueden ausentarse por años, el día que llueva se creará un río rápidamente.

#### **Ríos alóctonos**

Ríos de zonas áridas cuya agua proviene de zonas lluviosas. Un ejemplo clásico de este tipo de río es el río Nilo en Egipto.

### **6.1.3. Clasificación de los Rios según su geomorfología**

#### **Ríos rectilíneos**

Son de sinuosidad baja y de un solo canal. Son muy inestables y suelen transformarse en otro tipo de río.

#### **Ríos anastomosados**

Corrientes de agua que presentan varios canales. Como están muy ramificados, sus corrientes no suelen ser fuertes.

**Ríos meándricos**

Son de sinuosidad alta y de un único canal. Presentan una curva sobre el canal, lo que genera dos velocidades para el agua que son muy distintas en ambas orillas.

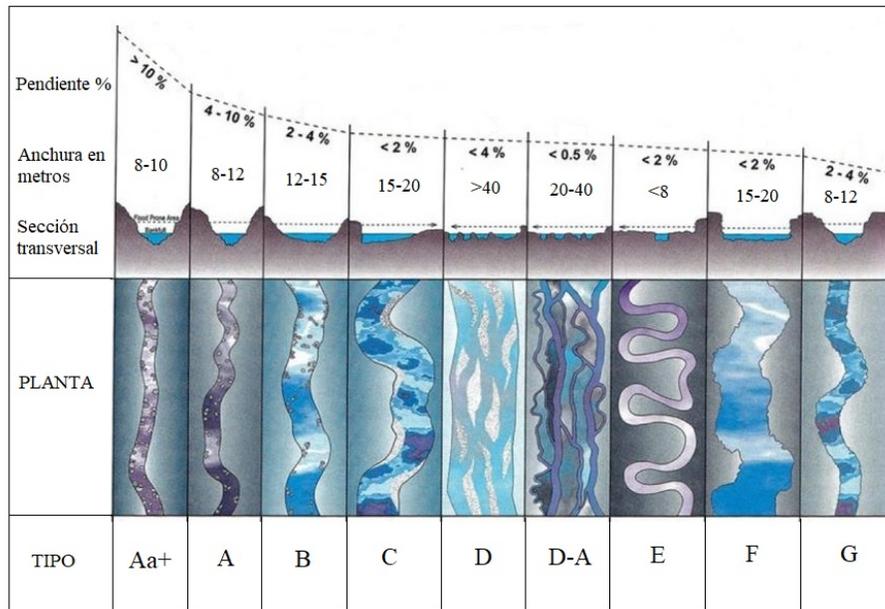


Figura 6: Tipos morfológicos de ríos diferenciados por Rosgen (1996) en el Nivel I de su clasificación. River morphological types identified by Rosgen (1996) at the Level I in his classification.[22]

Algunos ríos son especiales porque son más cortos y angostos que el resto. Estos ríos reciben el nombre de riachuelo o arroyo.

**Arroyo**

Un arroyo es una corriente de agua que suele fluir con continuidad, su bajo caudal lo diferencia de un río ya que el arroyo incluso puede llegar a desaparecer en las estaciones más secas del año.

**Quebrada**

Se utiliza como sinónimo de arroyo, pequeño río o riachuelo, con un caudal muy modesto en comparación con otras corrientes de agua, que no resulta

ideal para actividades como la pesca (en volúmenes considerables) o la navegación. Por lo general, las especies de peces que viven en una quebrada son de tamaño muy pequeño.

### **Riachuelo**

Un riachuelo es un pequeño curso de agua de poco caudal, el término, diminutivo de río, puede utilizarse como sinónimo de arroyo (una corriente de agua de bajo caudal que suele fluir con continuidad).

### **Afluente**

El concepto de afluente es habitual en la hidrología en referencia al cuerpo de agua cuya desembocadura no se produce en el mar, sino que lo hace en un río superior o de mayor importancia. El afluente o tributario se une al effluente en el sitio o zona conocida como confluencia.

### **Afluente y Efluente**

La diferencia entre afluente y efluente sea establecida por la importancia de cada río según su longitud, caudal o superficie de cuenca. De esta manera, el río considerado más sobresaliente es el efluente, y el que aporta las aguas al otro río constituye el afluente.

### **Cuenca**

Una cuenca, según la teoría, puede ser un accidente de carácter geográfico que supone una depresión en la superficie de la Tierra, un valle en medio de alturas o un terreno cuyas aguas se dirigen hacia el mismo mar, río o lago.

## **6.2. Caracterización de la Subcuenca río Quindío**

### **6.2.1. Localización y extensión**

La Subcuenca río Quindío con  $65,35Km$  de recorrido, nace en el extremo nororiental del municipio de Salento en el páramo del Quindío ( $3780msnm$ )[37], en su origen forma la Quebrada San José, con una longitud de  $10,5Km$  desde su nacimiento a  $3700msnm$  hasta unirse en la Quebrada Cárdenas. La extensión territorial de la cuenca se enmarca entre las coordenadas  $1141686,1$  m E,  $972745,5$  m N y  $1187987,2$  m E,  $1013447,9$  m N. La unidad hidrográfica se encuentra en los municipios de Salento, Armenia,

Calarcá y La Tebaida[26].

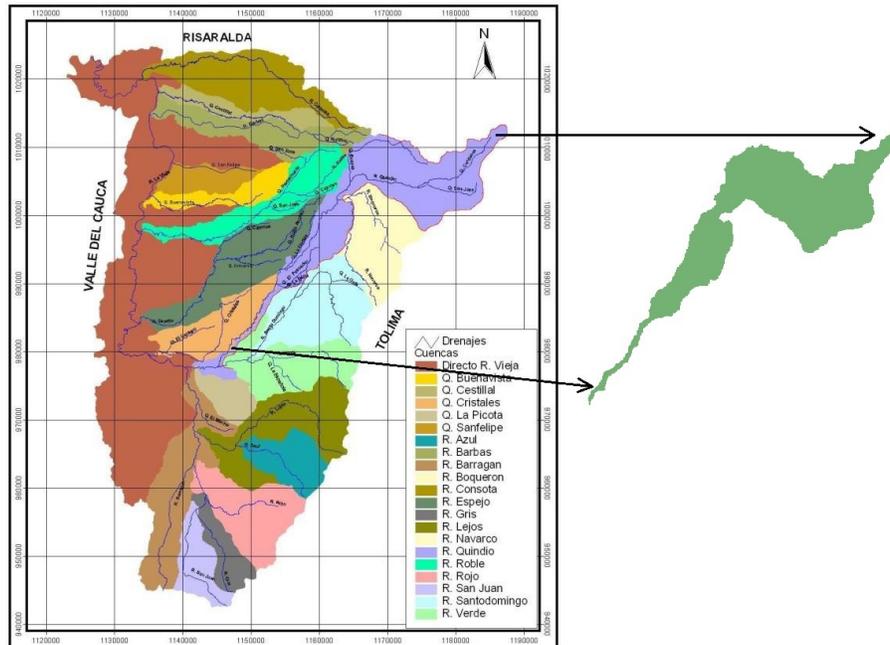


Figura 7: Subcuenca río Quindío[26]

La Subcuenca río Quindío recibe como afluentes principales las quebradas: Cárdenas, Peligrosa, La Honda, San Pacho, El Bosque, Santa Rita, Boquía y La Víbora. Entre los municipios de Salento y Armenia el río Quindío recibe las aguas del río Navarco, el cual tiene como afluentes el Río Boquerón y las quebradas: La Mina, Los Patos, Santa Librada, y San Julián; las quebradas: Cusumbo, Chagualá, Castillo, La Duquesa, y La Florida[54] (zona urbana de Armenia) desembocan directamente en el río Quindío. Provenientes del municipio de Calarcá las quebradas El Pescador y La Bella, del municipio de Córdoba, río Verde y la quebrada La Española, y del municipio de Buenavista las quebradas La Picota y Los Juanes; todas estas, desembocando en el río con un gran número de pequeñas corrientes. En los límites con el departamento del Valle del Cauca recibe las aguas del río Barragán, el cual nace en el sur del departamento en el páramo de Barragán, proyectándose desde allí hacia el norte[54]. La convergencia de los ríos Quindío y Barragán da origen al río La Vieja.

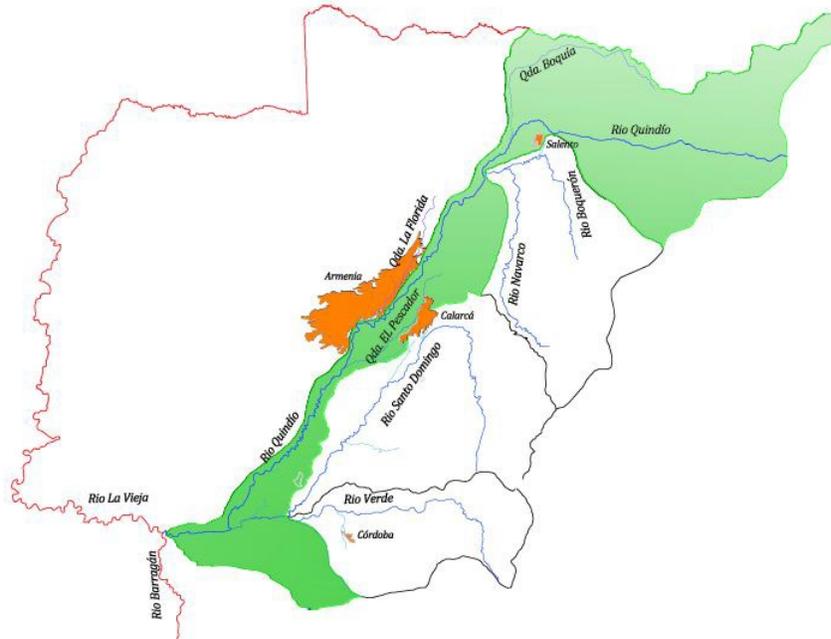


Figura 8: Afluentes del río Quindío[26]

También provee de agua a los acueductos municipales de Armenia, Circasia, Salento y La Tebaida permitiendo el abastecimiento de este vital líquido aproximadamente a 300.000 habitantes quienes representan el 55 % de la población quindiana[55]. El área hidrográfica del río Quindío se encuentra ubicada en la subzona hidrográfica 2612, según la clasificación del Instituto Colombiano de Hidrología y Estudios Ambientales (IDEAM).

En la unidad hidrográfica del río Quindío las principales demandas de agua que se presentan son abastecimiento humano y generación de energía, en una escala menor se presentan otras demandas relacionadas con actividades productivas de tipo industrial y agropecuario. De esta se abastecen los municipios de Salento (Quebradas Cruz Gorda, La Cristalina y Bolívar), Armenia (Cauce principal) y Buenavista (Quebrada La Picota). Igualmente se proporciona agua para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) ubicadas a lo largo del cauce principal. El Campestre, Bayona, La

Unión y El Bosque[26].

### 6.2.2. Economía

La economía del departamento depende básicamente del sector agropecuario, sobresalen los cultivos de café, plátano, cítricos, yuca y las exportaciones pecuarias de carne y leche, como las más importantes, Calarcá tiene a su cargo el 75 % de las plantas de generación eléctrica por lo cual presenta la mayor demanda con 8.467,49 *l/seg*[54], seguido de Armenia con 5.261,49 *l/seg*. Las mayores demandas de agua son para generación de energía eléctrica (plantas “El Bosque” de Armenia con 3.500 *l/seg* y “Campestre”, “Bayona” y “La Unión” de Calarcá con 2700 *l/seg* y para el acueducto de Armenia con 1.500 *l/seg*[37], las corrientes con mayor volumen de agua concesionada son el río Quindío con 13.730 *l/seg*, el río Santo Domingo con 281.21 *l/seg* y el río Verde con 192.55 *l/seg*[54].

De acuerdo con las Cuentas Nacionales Departamentales presentadas por el DANE en marzo de 2011, la estructura del PIB del Quindío se conforma de la siguiente manera: Comercio, reparación, restaurantes y hoteles 22.9 %, Actividades de servicios sociales, comunales y personales 19.7 %, agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca 14.9 %, Establecimientos financieros, seguros, actividades inmobiliarias y servicios a las empresas 12.1 %, construcción 10.3 %, transporte, almacenamiento y comunicaciones 8.0 %, industria manufacturera 7.3 % y electricidad, gas y agua 4.6 %. Sin considerar el café, la producción agrícola está liderada por el cultivo de plátano con un 96 %, le sigue la siembra de yuca con un 2 %. En el sector pecuario, el ganado bovino ocupa la primera posición con un 86 %, mientras en la segunda se ubica el porcino con un 11 %[54].

### 6.2.3. Distribución de la cuenca

La extensión de la Cuenca es de 2,880,14  $Km^2$  correspondiéndole el 68 % al Quindío (1,961, 83  $Km^2$ ), el 10 % al Risaralda (298, 86  $Km^2$ ) y el 22 % al Valle del Cauca (619, 45  $Km^2$ ). La población total para la Cuenca es de 1,140,378 habitantes, correspondiéndole al Quindío el 53,7 % del total (612,719 *hab.*), al Valle el 19,3 % (219,626 *hab.*) y a Risaralda el 27,0 % (308,033 *hab.*)

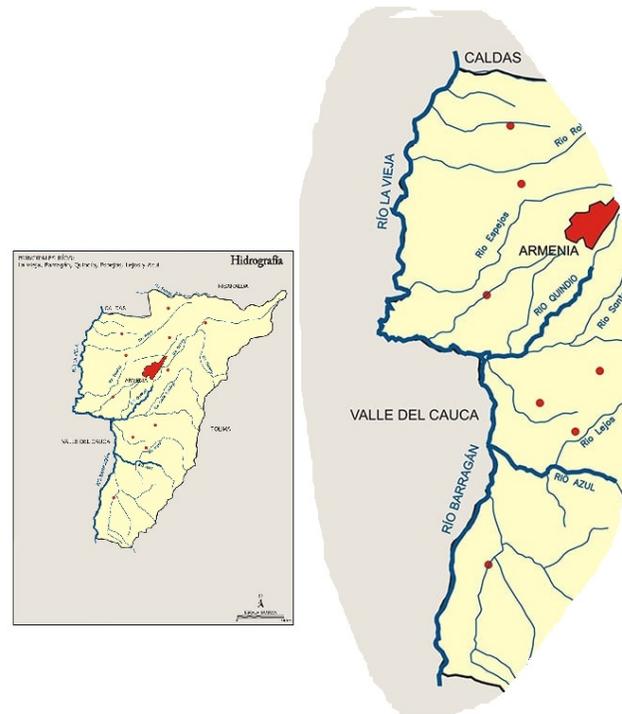


Figura 9: Distribución de la cuenca[35]

La cuenca presenta una distribución adecuada de tributarios, la zona alta presenta un alto número de pequeñas corrientes que favorecen la irrigación del territorio y la constituyen en la principal zona de producción hídrica, con un área total de  $718.87 \text{ km}^2$ , el caudal promedio de la cuenca alta es de  $3.77 \text{ m}^3/\text{seg}$  lo que genera un rendimiento de  $18.8 \text{ l}/(\text{segkm}^2)$ , mientras que la cuenca media alcanza un caudal promedio de  $15.31 \text{ m}^3/\text{seg}$  y un rendimiento de  $36.4 \text{ l}/(\text{segKm}^2)$  [54], por ser una cuenca de montaña se esperaría que el rendimiento disminuyera desde la cuenca alta hacia la baja, relación que no se da para el río Quindío, lo que podría explicarse por la disposición que presentan sus tributarios y la conservación de bosques de niebla y humedales, actualmente amenazados por fenómenos de colonización, potrerización y minería.

La principal oferta la constituye el río Quindío, le siguen los ríos Navarco y Santo Domingo donde existe la amenaza real y constante por la

contaminación de aceites, químicos y sustancias peligrosas provenientes de accidentes viales sobre la carretera la línea, el principal corredor vial del país, también se debe agregar los impactos que genera la construcción del mencionado túnel. El panorama no es mejor para el río Navarco, corriente sobre la que está proyectada la construcción del embalse[36].

### 6.3. Temperatura del agua

La temperatura es un parámetro físico que permite medir las sensaciones de calor y frío, se considera una representación de la energía cinética interna media de las moléculas que integran el cuerpo estudiado, en este caso el agua; es un movimiento molecular aparentemente desorganizado, la energía potencial es cuando un sistema absorbe calor y la energía cinética es el mismo sistema emitiendo calor, el calor siempre fluye desde una región con temperatura más alta hacia otra región con temperatura más baja esta transferencia o dispersión del calor puede ocurrir a través de tres mecanismos posibles, la conducción, la convección y la radiación[48].

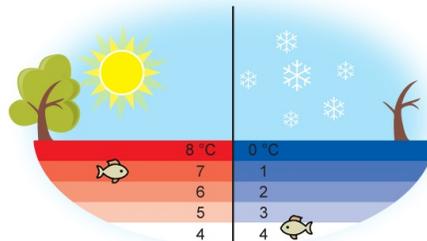


Figura 10: Temperatura del agua[49]

El sol es la principal fuente de energía para todos los procesos que ocurren en el sistema tierra - atmósfera – océano -ríos, más del 99,9 % de la energía que este sistema recibe proviene del sol, la radiación solar determina la calidad y cantidad de luz y además afecta la temperatura del agua, los organismos sometidos a cambios estacionales soportan más los cambios de temperatura y sus ciclos de vida están acoplados a estos cambios[38].

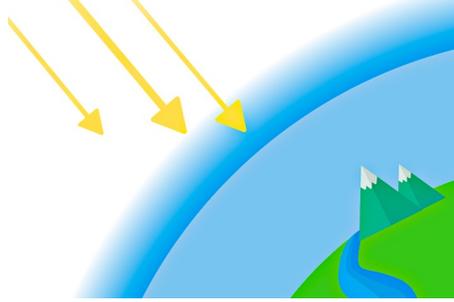


Figura 11: Temperatura Solar[50]

El fenómeno de transferencia de calor por conducción constituye un proceso de propagación de energía en un medio sólido, líquido, o gaseoso mediante la comunicación molecular directa cuando existe un gradiente de temperatura. Al haber un gradiente de temperatura en el medio, la segunda ley de la termodinámica establece que la transferencia de calor se lleva a cabo de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura.

$$q^n = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

donde  $q^n$  : es el flujo de calor por unidad de área o densidad de calor en una dirección  $x$ .

$k$  : es la conductividad térmica del material denotado por  $W/mk$  (watt por metro kelvin).

$T$  : es la temperatura. Esta ecuación es conocida también como la ley de Fourier.

La transferencia de calor por convección es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido en la vecindad de una superficie, y está íntimamente relacionada con su movimiento. Aquí el gradiente de temperatura en el fluido depende de las características del flujo de este.

$$q^n = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

donde  $h$  : es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, denotado por  $W/m^2K$  (watt por metro cuadrado kelvin).

$T_s$  : es la temperatura de la pared sólida que entrega calor.

$T_\infty$  : es la temperatura del fluido adyacente a la pared.

El signo menos indica que la conducción de calor es en la dirección decreciente de la temperatura, esta ecuación es conocida también como la ley de Newton de enfriamiento.

### 6.3.1. Contaminación Térmica

El calentamiento o contaminación térmica, provoca alteraciones en el medio ambiente como: modificación en los ciclos biológicos de los seres vivos, los ecosistemas acuáticos presentan un desplazamiento aguas arriba de las especies fluviales, un adelantamiento del ciclo biológico de las especies a épocas más tempranas, desaparición de especies por la pérdida de sus características óptimas de desarrollo. La temperatura representa una de las características más significativas de un cuerpo de agua que desempeña un papel importante en el modelado de la calidad del agua ya que controla muchos procesos fisiológicos y bioquímicos y afecta la solubilidad de gases y sólidos (los gases tienden a ser menos solubles en agua tibia, mientras que la solubilidad de los sólidos incrementa al aumentar la temperatura), En un río o arroyo natural, la temperatura del agua depende de varios factores y puede variar de un instante a otro, la estimación total de calor para un cuerpo de agua incluye los efectos del intercambio de calor con el fondo del agua, los terraplenes del borde de río, la temperatura atmosférica, el calor generado por las reacciones químicas y bioquímicas, la entrada y salida de agua con diferentes temperaturas [56].

La revista *iagua* en su publicación de marzo del 2014 describe como el calor de las aguas de los ríos que drenan el Océano Ártico está contribuyendo a que se derrita el hielo marino cada verano [102]. *Figura 12* Los impactos de estas aguas de ríos cálidos están aumentando debido a tres factores: primero los ríos son transportadores efectivos de calor a través de inmensas cuencas, segundo el volumen total de agua que se descarga de los ríos ha aumentado y como tercero los ríos son cada vez más cálidos a medida que sus cuencas de drenaje se calientan [102].

Los ríos son solo una de las muchas fuentes de calor que ahora cambian el Océano Ártico. Todo el sistema ártico se encuentra en un estado

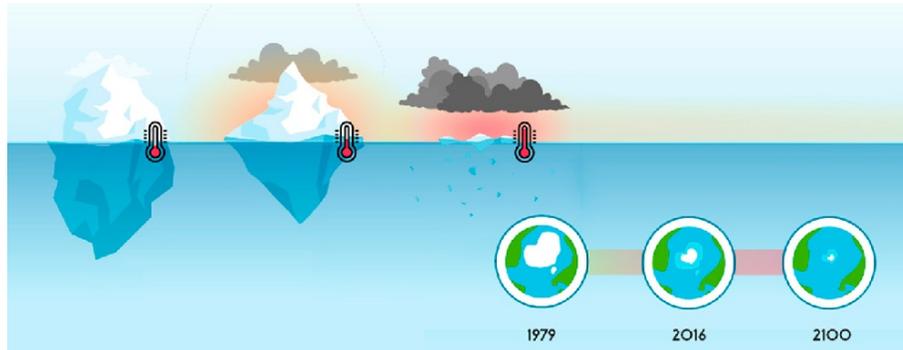


Figura 12: Deshielo del Ártico, Fundación acciona ORG[53]

extremadamente anómalo a medida que aumenta la temperatura del aire global y el agua cálida del Atlántico y el Pacífico ingresa a la región, lo que hace que el hielo marino se derrita incluso en medio del invierno.

Se puede considerar a la temperatura del agua como una población cuya densidad varía en cada hora del día produciendo fluctuaciones diarias más o menos estables dependiendo de factores externos, tales como la radiación, el viento, características ambientales y otros. La tasa de crecimiento de la temperatura varía en relación con las horas del día.

### 6.3.2. Causas del aumento de la temperatura del agua

La calidad del agua en los ríos y arroyos puede ser alterada mediante una inyección de calor que aumenta la temperatura del agua y genera contaminación térmica, esto ocurre por diferentes hechos, tales como el vertido directo de contaminantes en el agua. Como pueden ser desechos de producción industrial, plásticos y basura en general. El problema del micro plásticos, de hecho, es cada vez mayor y al parecer, hemos subestimado la cantidad que hay en nuestros océanos. Otro hecho importante es el calentamiento global. Que altera el equilibrio de los ríos, uno de los efectos principales es la pérdida de oxígeno en el agua. La temperatura del agua es, por lo tanto, la variable significativa y se puede utilizar en ecuación del transporte de contaminantes, de la misma manera que la concentración de un contaminante químico o biológico, las descargas de aguas a altas

temperaturas pueden causar daños a la fauna y flora de las agua receptoras al intervenir con la reproducción de especies, incrementar el crecimiento de bacterias y otros organismos que no pertenecen a su entorno natural[38].

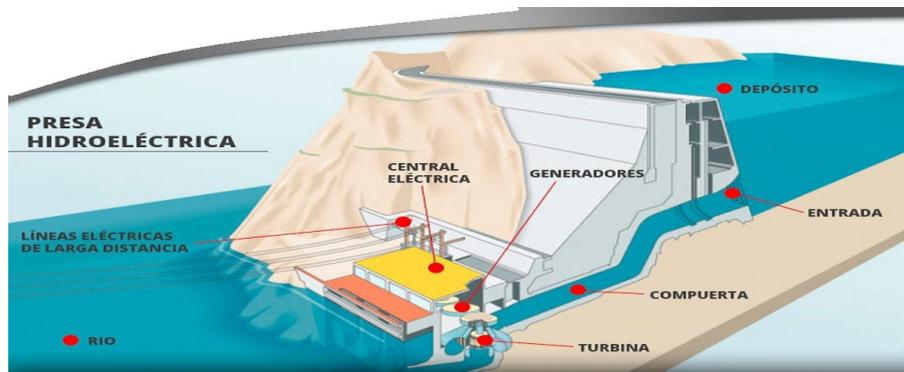


Figura 13: Central hidroeléctrica, UNESA Didactalia material educativo[52]

Las fuentes de calor son factores clave para la simulación de la temperatura del agua en un modelado matemático de la contaminación térmica, dichas fuentes contaminantes pueden ser por descargas de agua caliente o por contacto directo del agua del río con un cuerpo más caliente completamente sumergido en la corriente. Cualquiera que sea la forma de contaminación térmica el agua caliente descargada en un río, lago o mar provoca corrientes de densidad que modifican el comportamiento original del río y altera la circulación natural, notables en la superficie libre y en las capas superiores del agua en una corriente[57]. En toda la sección transversal del río, se pueden identificar varios niveles de agua a diferentes temperaturas, con un transporte de calor vertical, normalmente desde la superficie libre hacia el fondo del río.

Las centrales termoeléctricas o las nucleares, dos de los sistemas de generación de energía más comunes de la actualidad, se encuentran entre los principales causantes de contaminación térmica en el mundo, en estas instalaciones, el combustible se transforma en calor para producir energía, luego se debe expulsar al exterior grandes cantidades de calor. Para enfriarlo, se utilizan volúmenes importantes de agua, y por ello, este tipo de centrales se ubican en lugares costeros o cercanos a lagos o grandes ríos, como se ve en la *Figura 13*.

## 6 MARCO TEORICO

En los ecosistemas acuáticos, la alteración de uno o dos grados centígrados puede provocar un elevado impacto ambiental, los animales de sangre fría como los peces o los anfibios, son muy sensibles a las variaciones térmicas y el aumento de la temperatura del agua puede afectar a su sistema reproductivo, por lo que la actividad bacteriana y de parásitos se estimula y favorece la aparición de enfermedades.



Figura 14: Fundación acciona ORG[53]

El calor acelera la actividad metabólica. Los organismos afectados consumen más alimentos en menos tiempo y reducen los recursos del entorno, con la consecuente disminución de las poblaciones. Otro posible efecto negativo es la eutrofización del agua, un proceso que favorece el crecimiento rápido de algas y otras plantas verdes que enturbian el agua.

Desde el punto de vista general de la física, la contaminación térmica es el peor tipo de alteración natural del agua, mucho peor que la contaminación química causada por la inyección de desechos en el agua. De hecho, casi siempre es posible eliminar un compuesto químico de una corriente, antes de que llegue al medio ambiente, mediante un proceso de tratamiento adecuado (las únicas limitaciones son la disponibilidad de tecnología adecuada y el costo de la implementación del proceso). Por el contrario, la eliminación del calor del agua se rige por las leyes físicas, y el hombre puede hacer muy poco para evitar que el calor llegue al medio ambiente (*Parker y Krenkel, 1969*). En el Acuerdo de París ratificado en 2015, la mayoría de países del mundo (196 Partes, para ser más exactos) acordaron mantener por debajo de 2°C

el incremento de la temperatura global del planeta y hacer esfuerzos para limitarlo a  $1,5^{\circ}C$ . La fecha fijada para llegar a estos objetivos es 2050. Pero la realidad es que, a este paso, en algo más de 20 años habremos superado el primero de los límites.

La pregunta es ¿qué pasa si los países no cumplen? En el último informe del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático) cerca de 100 científicos analizaron qué impacto tendría en el planeta si el calentamiento global alcanzara el techo de  $1,5^{\circ}C$  y/o el de  $2^{\circ}C$  y las conclusiones son claras: o nos damos prisa o nos quedamos sin planeta.

### **6.3.3. Concentraciones establecidas por guías internacionales**

Según la legislación canadiense para agua de consumo la concentración máxima aceptable de temperatura es  $15^{\circ}C$ , en la norma ecuatoriana establece  $CN + / - 3^{\circ}C$  (condiciones normales con una variación de  $3^{\circ}C$ ) el mismo valor se establece para este uso, según la directiva CEE recomienda  $25^{\circ}C$  que varía de acuerdo circunstancias climáticas o geográficas excepcionales, la temperatura Recomendable para uso recreacional para contacto directo entre  $15^{\circ}C - 35^{\circ}C$ .

La temperatura aceptable para el consumo humanos para una concentración máxima aceptable de  $15^{\circ}C$ , en temperaturas altas disminuye la concentración de OD, y otras legislaciones consideran la temperatura del agua de la zona con una variación de  $3^{\circ}C$ , y la temperatura recomendable en periodos extendidos de inmersión entre  $15 - 35^{\circ}C$

## 6.4. Teoría de Redes

El concepto de redes es muy intuitivo para todos en la sociedad moderna. Tan pronto como vemos esta palabra pensamos en un grupo de elementos interconectados. Según el diccionario de inglés de Oxford (2010) la palabra red, apareció por primera vez en el idioma inglés en 1560, en la Biblia de Ginebra, Exodo 27:4, “Y le harás una rejilla como red de bronce”. En este caso se refiere “a una disposición en forma de red de hilos, alambres”. Posteriormente se introdujeron nuevos usos para la palabra en 1839 para ríos y canales, en 1869 para ferrocarriles, en 1883 para distribuciones de cables eléctricos, en 1914 para radiodifusión inalámbrica, y en 1986 para referirse a Internet, entre muchos otros.[39]

Actualmente, el OED (2010) define una red como un “arreglo de líneas horizontales y verticales que se cruzan” o “un grupo o sistema de personas o cosas interconectadas”, incluyendo los siguientes ejemplos: un sistema complejo de vías férreas, caminos u otros; un grupo de personas que intercambian información con fines profesionales o sociales; un grupo de estaciones de radiodifusión que se conectan para la transmisión simultánea de un programa; una cantidad de computadoras, máquinas u operaciones interconectadas; un sistema de conductores eléctricos conectados.[39]

Muchos sistemas en la naturaleza se pueden describir por medio de redes complejas, que topológicamente son grafos (estructuras matemáticas formadas por nodos (o vértices) conectados por enlaces (o aristas)), los nodos que conforman estas redes, tienden a formar grupos altamente conectados y la modelación de redes nos permite la resolución de múltiples problemas de programación matemática.

- Internet es una red de routers o dominios conectados por líneas físicas.
- La World Wide Web es una red de sitios web conectados por hiperenlaces.
- El cerebro es una red de neuronas conectados por medio de las sinapsis.
- Una organización es una red de personas con diversos tipos de conexiones entre ellas.
- La economía mundial es una red formada por las economías nacionales.

Una red simple es el par  $G = (V, E)$ , donde  $V$  es un conjunto finito de nodos y  $E$  es una relación simétrica y anti reflexiva en  $V$ . En una red dirigida la relación  $E$  no es simétrica[43].

La definición anterior no permite la presencia de múltiples enlaces y bucles automáticos. En consecuencia, presentamos la siguiente definición más general de red.

Una red es la triple  $G = (V, E, J)$ , donde  $V$  es un conjunto finito de nodos,  $E \subseteq V$ ,  $V = (e_1, e_2, \dots, e_m)$  es un conjunto de enlaces, y  $f$  es un mapeo que asocia algunos elementos de  $E$  a un par de elementos de  $V$ , como que si  $v_i \in V$  y  $v_j \in V$ , entonces  $f : e_p \rightarrow [v_i, v_j]$  y  $f : e_p \rightarrow [v_j, v_i]$ . Una red ponderada se define reemplazando el conjunto de enlaces  $E$  por un conjunto de pesos de enlace  $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ , tal que  $w_i \in \mathfrak{R}$ . Entonces, una red ponderada se define por  $G = (V, W, f)$ [43].

#### 6.4.1. Antecedentes históricos

El problema de los siete puentes de Königsberg *Figura 15*, es un célebre problema matemático resuelto por el matemático Suizo Leonhard Euler en 1736 y cuya resolución dio origen a la teoría de grafos. Los distintos territorios en los que los puentes dividieron la ciudad se convirtieron en puntos, es decir, en vértices; y los puentes se convirtieron en líneas, lo que llamamos aristas. También determina que hay un punto de inicio y un punto de salida. Euler consiguió, a partir de este sencillo esquema, encontrar la solución de una forma mucho más elegante que la que aplicamos en un principio.

Se mostrará una secuencia cronológica sobre como empezaron el estudio de esta ciencia[42].

- 1847 Se publica la primera aplicación de la teoría de grafos, las leyes de Kirchhoff en análisis de redes eléctricas. Estas leyes de los circuitos se utilizan para calcular el voltaje y la corriente en los circuitos eléctricos.
- 1852 Se propone uno de los problemas más famosos. El problema de los cuatro colores. El cual enuncia: “¿Es cierto que cualquier mapa dibujado en el plano puede tener sus regiones coloreadas con cuatro colores, de modo que dos regiones vecinas tengan colores diferentes?”.

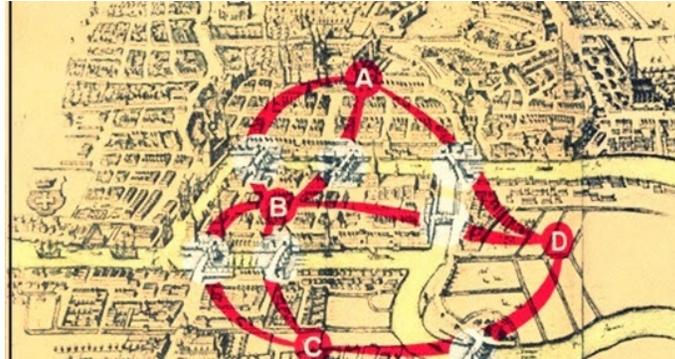


Figura 15: Puentes de Königsberg 1736[41]

Planteado por Francis Guthrie y su primer registro es en una carta de De Morgan a Hamilton el mismo año.

- 1857 Arthur Cayley resolvió el problema de la enumeración de isómeros (ej: alcohol etílico) por medio de grafos. Para ello representó cada compuesto, en este caso hidrocarburos saturados  $C_nH_{2n+2}$ , mediante un grafo árbol donde los nodos representan átomos y los arcos la existencia de enlaces químicos.
- 1878 El término grafo es acuñado por Silvester en un artículo publicado en Nature. Donde traza una analogía entre invariantes cuánticas y co-variantes.
- 1936 Se publica el primer libro de Teoría de Grafos, escrito por el matemático judío húngaro Dénes König.
- 1953 Se introduce por primera vez el cálculo de APSP por Shimbel. Quien descubrió que puede ser resuelto por una serie lineal de multiplicaciones en matrices. APSP son las siglas en inglés de All pairs Shortest Path, traduce “Camino más cortos entre todos los pares”.

#### 6.4.2. Estructura de una red

En una red, la distancia entre dos vértices o nodos de un grafo, forman un camino geodésico, esta línea geodésica en geometría representa el camino más corto entre dos vértices[45]. Si dos vértices no son accesibles a través de un camino, entonces la distancia entre ellos es infinita[47]. Por otro lado la

distancia media  $L$ , define el número medio de pasos que hay que recorrer a través del camino más corto para todos los posibles pares de vértices de la red.  $L = \frac{n}{n(n-1)} \sum_{i \geq j} dij$ : Donde  $n$  representa el número de vértices;  $dij$  es la distancia geodésica desde el vértice  $i$  hasta el vértice  $j$  y  $n(n-1)$  representa el número total de variaciones sin repetición de dos elementos, es decir el número de parejas distintas de vértices en la red[45].

- Por lo tanto un grafo tiene  $N$  nodos y  $L$  aristas y se denota como  $G(N, L)$  o simplemente  $(N, L)$ .
- Cada vértice o nodo  $n_i$  viene determinado por su orden  $i$  en el conjunto  $N$ .
- Las aristas vienen definidas por los órdenes de los nodos que unen, es decir, la unión entre los vértices  $n_i$  y  $n_j$  se denota por  $l_k = (i, j) = (n_i, n_j) = l_{ij}$ . En este caso, si hay una unión o arista entre dos nodos, los nodos se llaman vecinos o adyacentes.
- Una arista de la forma  $l_k = (i, i)$  es decir conecta el nodo  $i$  consigo mismo se denomina un lazo, auto-unión o auto-conexión (*tadpole*). Pueden aparecer tanto en redes dirigidas como no dirigidas.
- Dos aristas que unen dos mismos vértices se llaman paralelas.
- Aristas que tienen en común un vértice se llaman aristas adyacentes.

El lenguaje de las redes es el lenguaje de la teoría de grafos, es útil presentar algunos de los términos más utilizados[43]

**Adyacencia e incidencia:** Dos nodos  $u$  y  $v$  son *adyacentes* si están unidos por un enlace  $e = (u, v)$ . Los nodos  $u$  y  $v$  *inciden* en el enlace  $e$  y el enlace  $e$  es *incidente* con los nodos  $u$  y  $v$ . Dos enlaces  $e = (u, v)$  y  $e = (v, w)$  son *adyacentes* si ambos son incidentes con al menos un nodo. El grado del nodo es el número de enlaces que inciden con un nodo dado.

**Adyacencia e incidencia (dirigida):** El nodo  $u$  es *adyacente* al nodo  $v$  si hay un enlace dirigido de  $u$  a  $v$   $e = (u, v)$  un enlace de  $u$  a  $v$  es *incidente* de  $u$  e *incidente* a  $v$ ;  $u$  es *incidente* a  $e$ , y  $v$  es *incidente* de  $e$ . El grado de un

nodo es el número de enlaces incidentes a él, y su grado externo es el número de enlaces incidentes de él.

**Isomorfismo.** Dos redes  $G_1$  y  $G_2$  son isomorfas si hay una correspondencia uno a uno entre los nodos de  $G_1$  y los de  $G_2$ , como el número de enlaces que unen cada par de nodos en  $G_1$  es igual a la unión del par correspondiente de nodos en  $G_2$ . Si las redes están dirigidas, los enlaces deben coincidir no sólo en número sino también en dirección.

**Camino.** Un camino (dirigido) de longitud  $l$  es cualquier secuencia de nodos (no necesariamente diferentes)  $v_1, v_2, \dots, v_l, v_{l+1}$  de tal manera que para cada  $i = 1, 2, \dots, l$  hay un enlace de  $v_i$  a  $v_{i+1}$ . Este camino se conoce como un camino de  $v_i$  a  $v_{l+1}$ . Un *camino* cerrado de longitud  $l$  es un paseo  $v_1, v_2, \dots, v_l, v_{l+1}$  en la cual  $v_{l+1} = v_1$ .

**Ciclo.** Un ciclo es cerrado en el que todos los enlaces y todos los nodos (excepto el primero y el último) son distintos.

**Red subyacente.** Esta es la red obtenida de una red dirigida mediante la eliminación de la direccionalidad de todos los enlaces.

**Componentes conectados.** Una red (dirigida) se *conecta* si hay un camino entre cada par de nodos en la red (subyacente). De lo contrario se *desconecta*. Cada subgrafo conectado es un *componente conectado* de la red.

**Conectividad.** La *conectividad de nodo* de una red conectada es el menor número de nodos cuya eliminación hace que la red se desconecte. El *borde de conectividad* de una red conectada es el menor número de enlaces cuya eliminación hace que la red se desconecte.

**Recortes.** Un *corte de nodos* de una red conectada es un conjunto de nodos como la eliminación de todos ellos desconecta la red. Un *recorte de enlace* de una red conectada es un conjunto de enlaces de tal manera que la eliminación de todos ellos desconecta la red.

**Componente fuertemente conectado.** Una red dirigida está *fuertemente conectada* si hay un camino entre cada par de nodos. Los *componentes fuertemente conectados* de una red dirigida son sus subgrafos máximos

fuertemente conectados.

### 6.4.3. Propiedades de una red

Algunas de las propiedades más importantes que determinan la estructura (o topología) de una red son las siguientes[46]

- **La distribución de conexiones (o vecinos)  $P(k)$ :** Es la probabilidad de que un nodo escogido al azar tenga  $k$  conexiones (o vecinos). Por ejemplo, en una red de contactos sexuales  $P(k)$  es la probabilidad de que una persona escogida al azar en una sociedad haya tenido  $k$  parejas sexuales distintas a lo largo de su vida.
- **El coeficiente de agregación  $C$ :** Es la probabilidad de que dos nodos conectados directamente a un tercer nodo, estén conectados entre sí. Por ejemplo, en una red de amistades, es la probabilidad de que dos de mis amigos sean ellos mismos amigos uno del otro.
- **La longitud mínima  $L_{ij}$  entre dos nodos  $v_i$  y  $v_j$ :** Es el número mínimo de “brincos” que se tienen que dar para llegar de un nodo  $v_i$  de la red a otro nodo  $v_j$  de la red.
- **La longitud promedio de la red  $L$ :** Es el promedio de las longitudes mínimas  $L_{ij}$  entre todas las posibles parejas de nodos  $(v_i, v_j)$  de la red.
- **La distribución de tamaños de islas  $P(s)$ :** Es la probabilidad de que una isla esté compuesta por  $s$  nodos.
- **El tamaño de la isla más grande,** al que denotaremos por  $S_\infty$ .
- **Islas (o sub redes):** Son grupos de nodos que están conectados entre sí pero que no esta conectado al cuerpo principal de la red, lo cual no significa que dicha isla no pertenezca a la red.

## 6.5. Software necesarios

Cuando se trata de hacer una visualización de muchos datos, necesitamos a parte de analizar los datos, saber interpretarlos, contrastarlos con otros datos y estudiarlos, para así saber comunicarlos. Y sobre todo es fundamental poner los datos dentro de un contexto y compararlos con algo. Por tal motivo disponemos de las mejores herramientas de visualización de datos gratuita y eficiente ya que son sencillas de usar y no requieren conocimientos avanzados de desarrollo para poder utilizarlas, por nombrar algunas tenemos: *Tableau (Public)*, *Weave*, *Gephi*, *Many Eyes*, *NodeXL*, *Data-Driven Documents (d3)*, *Axiis*, *Google Fusion Tables* y muchas otras más.

### 6.5.1. Ghephi

Para nuestro trabajo con redes complejas dispondremos del software Gephi, quizá es la mejor plataforma de visualización de nodos que permite hacer grafos dinámicos y jerárquicos de la forma más sencilla.

Gephi es una aplicación de visualización desarrollada en lenguaje Java. Se utiliza principalmente para visualizar, manipular y explorar redes y gráficos a partir de datos de gráficos de nodos y bordes sin procesar. Es una aplicación gratuita y de código abierto. Está construido sobre la plataforma Netbeans y usa *OpenGL* para su motor de visualización. Funciona en *Windows*, *Mac OS X* y *Linux*. Es una excelente herramienta para que los analistas de datos y los entusiastas de la ciencia de datos exploren y comprendan gráficos. Es similar a *Photoshop* pero trata con datos gráficos. El usuario interactúa con la representación, manipula las estructuras, formas y colores para revelar patrones ocultos. El objetivo principal es permitir al usuario hacer una hipótesis, descubrir patrones ocultos, aislar las singularidades y defectos de la estructura durante la obtención de datos.

### Ventajas de usar Gephi

- **Extremadamente rápido:** está construido con el motor OpenGL. Entonces Gephi nos permite con redes muy grandes con muy alta velocidad. Puede visualizar redes de hasta un millón de elementos. Todas las acciones, como el diseño, el filtro y el arrastre, se ejecutan en

tiempo real.

- **Simple:** es muy fácil de instalar y comenzar. Es mejor conocido por su interfaz de ventana. Tiene una interfaz muy fácil de usar y está lleno de herramientas útiles.
- **Modular:** el software Gephi se divide en diferentes módulos. Todas sus características están envueltas en módulos separados. Cada módulo proporciona una función específica, lo que facilita mucho el mantenimiento del software.
- **Importación sencilla de datos:** el proceso de importación de datos es muy sencillo en formato CSV.

### 6.5.2. Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel que se utiliza para desarrollar aplicaciones de todo tipo, a diferencia de otros lenguajes como Java o .NET, se trata de un lenguaje interpretado, es decir, que no es necesario compilarlo para ejecutar las aplicaciones escritas en Python, sino que se ejecutan directamente por el ordenador utilizando un programa denominado interpretador, por lo que no es necesario “traducirlo” a lenguaje máquina.

Python es un lenguaje sencillo de leer y escribir debido a su alta similitud con el lenguaje humano. Además, se trata de un lenguaje multiplataforma de código abierto y, por lo tanto, gratuito, lo que permite desarrollar software sin límites.

#### Ventajas de usar Python

- Python es un lenguaje de alto nivel, por lo que es más fácil de usar que los de bajo nivel, puesto que estos últimos no tienen mucha abstracción de lenguaje de máquina. Con Python se pueden usar elementos del lenguaje natural, ya que tiene una sintaxis similar al inglés, por lo que es fácil de leer, escribir y aprender.

- Python al ser un lenguaje de propósito general se puede usar para diversos propósitos. Es una gran opción para el desarrollo de software, ya que permite a los desarrolladores utilizar grandes frameworks como Django y Flask. Además, se puede utilizar para scripts web, desarrollo de GUI de escritorio o data science.
- La biblioteca estándar de Python es muy extensa, puesto que contiene muchos módulos integrados. Además, los usuarios de Python también pueden encontrar bibliotecas adicionales disponibles en PyPI (índice de paquetes de Python).

La minería de datos o *data mining* es un proceso que permite analizar grandes bases de datos con el objetivo de predecir futuras tendencias. Se trata de un proceso complejo al que Python puede arrojar luz a través de la limpieza y organización de datos y del uso de algoritmos de aprendizaje automático que simplifica el análisis de datos. Con la creación de los motores numéricos como “Pandas” o “NumPy”, para trabajar con un gran número de datos y unido al gran número de bibliotecas existentes, hacen que Python sea uno de los lenguajes de programación más utilizados.

### 6.5.3. Utilización del Software

Con la ayuda del software *Gephi 0.9.2* se construyó la red hidrológica del río Quindío, utilizando informes de la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) y del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, permitiendo obtener información confiable para lograr resultados más ajustados a la realidad, el software nos permite visualizar la red con las dimensiones de la subcuenca del río Quindío. También se utilizó el lenguaje de programación *Python 3.9.6* con sus principales librerías matemáticas y estadísticas: *Numpy*, *Scipy*, *Matplotlib* y *pandas*.

Los nodos utilizados son: los nacimientos de los ríos, los puntos donde se conectan dos o más ríos y las desembocaduras; además de los lugares que representen vertimientos o zonas de monitoreo en el río[44].

**Nodos Naturales:** Son aquellos nodos que representan la ubicación geográfica sin intervención humana, los cuales pueden ser fuentes de ríos

o quebradas, bifurcaciones, confluencias o salidas.

**Nodos no Naturales o de Ingeniería:** Son aquellos nodos que representan como característica la intervención o control humano. En esta clasificación se encuentra centrales hidroeléctricas, depósitos de agua, estaciones de bombeo, vertimientos de aguas residuales o cualquier elemento artificial que se considere externo al cause natural de los ríos.

**Aristas:** Las aristas representan los causes naturales de los ríos y canales naturales o artificiales. Dado que el afluente del río fluye en una misma dirección, entonces se tiene una red dirigida o también llamada dígrafo. La función de las aristas es conectar los nacimientos, las bifurcaciones, las confluencias y los lugares de monitoreo del río.

En la *Figura 16* se muestra la red hidrográfica del departamento del Quindío. La red cuenta con 409 aristas y 408 nodos, se conoce como un dígrafo o grafo dirigido ya que es un tipo de grafo en el cual las aristas tienen un sentido definido por las flechas de los nodos[43]. Dado que la dirección esta de acuerdo al cause natural de los ríos o quebradas, los nodos descritos por nacimientos de ríos o quebradas (color verde), se dirigen hacia los nodos de intersecciones entre ríos y/o quebradas (color azul claro).

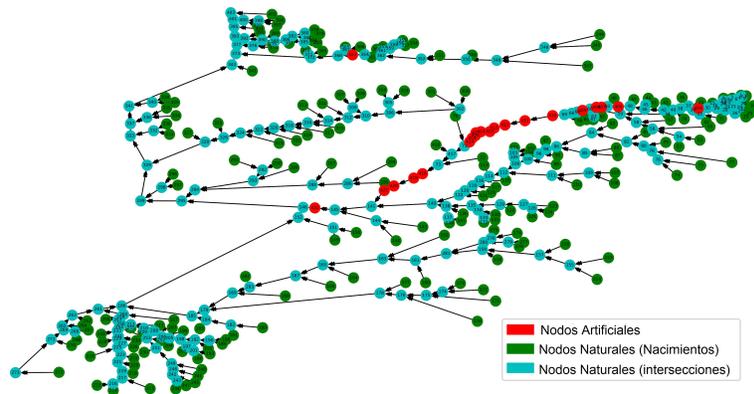


Figura 16: Diagrama de la red hidrográfica del departamento del Quindío.

- El color rojo representa los nodos artificiales, 21 nodos.

- El color verde los nodos naturales que son nacimientos de ríos o quebradas, 194 nacimientos.
- El color azul claro indica los nodos naturales que son intersecciones entre ríos y/o quebradas, 191 intersecciones de ríos. Los cuales pueden ser nodos de ingeniería o nodos naturales.

La red hidrográfica del río Quindío se encuentra dividida en diferentes cuencas, en la *Figura 17* se puede observar la distribución de las cuencas principales entre ellas se tienen la cuenca del río Quindío, las cuencas del río Lejos, San Juan y Rojo, la cuenca del río Espejo, la cuenca del río Roble, la cuenca de la quebrada Buenavista, y otras cuencas que desembocan directamente en el río La Vieja. De igual forma que en la *Figura 16* se tiene un grafo dirigido cuya dirección esta definida por las flechas de acuerdo al cauce natural de los ríos o quebradas.

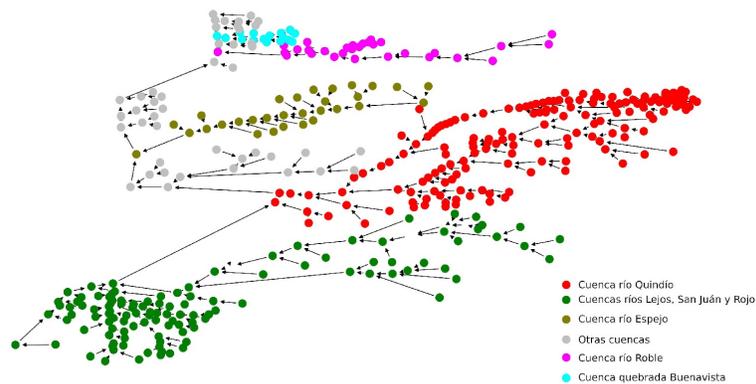


Figura 17: Distribución de las principales cuencas del departamento del Quindío.

## 6.6. Regresión No Lineal

Desde la estadística la regresión no lineal se considera un instrumento de análisis multivariado, de uso tanto explicativo como predictivo, se utiliza cuando se tiene una variable dependiente dicotómica y un conjunto de variables predictores o independientes, que pueden ser cuantitativas o categóricas,[58]

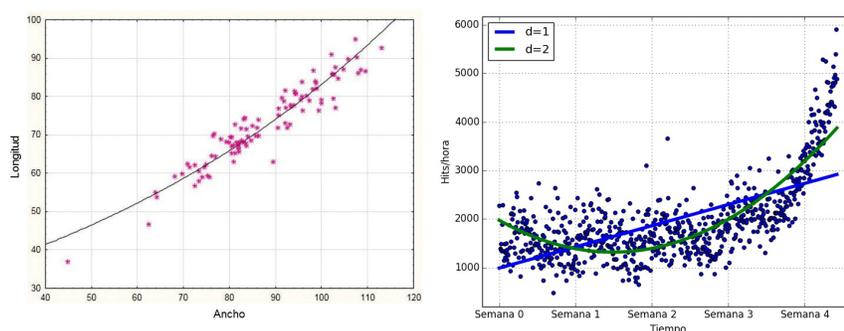


Figura 18: Modelos de regresión no lineal

El objetivo del análisis es poder efectuar predicciones del comportamiento, lo que se busca es estimar las probabilidades de un suceso definido por la variable dependiente en función de un conjunto de variables predictores, Se trata por tanto de identificar qué características o factores diferencian los grupos definidos por la variable dependiente, de esta forma determinar el modelo más parsimonioso y mejor ajustado que siendo razonable describa la relación entre la variable dependiente y un conjunto de variables predictores.

La técnica de la regresión no lineal se origina en la década de los años 60 con el trabajo de Gordon y Smith[59], siendo a partir de los años 80, con la ayuda de la informática aplicada, que se generaliza su uso. El análisis de regresión no lineal tiene dos modalidades: la no lineal binaria cuando se pretende explicar una característica o suceso dicotómico, (solo pueden tomar dos valores posibles, como sí y no) y la no lineal multinomial en el caso más general de querer explicar una variable cualitativa politómica, (cuando pueden adquirir tres o más valores)[60].

Por otro lado, desde el punto de vista de las variables independientes, éstas

pueden ser cualitativas, tanto dicotómicas como politómicas, o cuantitativas, y se puede considerar tanto el efecto individual de cada una como el efecto de la interacción.

### 6.6.1. Ventajas de la regresión no lineal

La regresión no lineal es una técnica muy empleada por los científicos de datos debido a su eficacia y simplicidad, debido a que no es necesario disponer de grandes recursos computacionales, tanto en entrenamiento como en ejecución, además, los resultados son altamente interpretables, Siendo esta una de sus principales ventajas respecto a otras técnicas. El peso de cada una de las características o predictores determina la importancia que tiene en la decisión final, por lo tanto, se puede afirmar que el modelo ha tomado una decisión u otra en base a la existencia de una u otra característica en el registro, lo que en muchas aplicaciones es altamente deseado además del modelo en sí.

### Antecedentes

El trabajo presentado por Carrera 2003[92], cuyo objetivo es mostrar la ductilidad de los modelos, matemáticos o estadísticos en particular el de una regresión no lineal de tipo logística, para la determinación de posibles factores de riesgo que aumenten la probabilidad de la presencia de altas concentraciones de *Cryptosporidium* en fuentes de aguas superficiales. Para el análisis de la calidad del agua se determinaron turbiedad y materia orgánica (MO: Oxígeno consumido del permanganato de potasio) como parámetros fisicoquímicos. En el grupo de las variables microbiológicas se consideraron: coliformes totales, coliformes termo tolerantes, *Escherichia coli* (*E.coli*), estreptococos fecales, *Enterococcus* spp y *Pseudomonas aeruginosa* (*P.aeruginosa*) y *Cryptosporidium*; además se incluyó el nivel hidrométrico (NH) correspondiente al día en que se realizaron las mediciones. Se empleó una regresión logística, para desarrollar un modelo predictor de la variable dicotómica concentración de valores de *Cryptosporidium* mayores o iguales a 300 unidades por cada 100 litro de agua a la que se denominó alto riesgo, siendo bajo riesgo, aquella donde los valores no superaron al señalado en la 45 muestras de aguas superficiales. El test de Hosmer-Lemeshow proporciono una medida global de exactitud predictiva y fue utilizado como una prueba de calidad de ajuste. Para analizar con mayor eficacia la bondad

del ajuste se utilizó la deviance (D), que es la medida más directa de su calidad (MacCullag and Nelder 1989); para medir la capacidad predictora global del resultado obtenido y comparar las salidas se construyeron las curvas ROC (Receiver Operating Characteristic) correspondiente a cada uno de los modelos obtenidos además de calcular el área bajo la curva (Zweig and Campbell 1993). El beneficio de poder contar con un modelo como los obtenidos se funda en su empleo como predictor de concentraciones de quistes de *Cryptosporidium*, con el empleo de técnicas propias de la estadística hacen posible explorar y analizar los probables factores de riesgo asociados con concentraciones de *Cryptosporidium* elevadas en aguas que se emplearan como fuentes para procesos de potabilización. La importancia del modelo radica en poder ejercer sobre ellos simulaciones que permiten probar acciones tendientes a evaluar los riesgos de fuentes de agua en la transmisión de enfermedades de origen, previo al experimento biológico en sí.

Un estudio de crecimiento realizado por Galindez 2005,[85] presenta una gran importancia para los encargados de planificar un aprovechamiento forestal. La modelación del crecimiento de las especies arbóreas permite la estimación de los momentos donde los árboles alcanzan el máximo crecimiento medio, información de utilidad para la planificación de una apropiada corta y renovación del bosque (Perpinal et al.,1993). no se deben aprovechar los bosques más allá de su crecimiento, Por ello es fundamental conocer el crecimiento en diámetro, altura y las variables que de ellas se derivan como son el área basal y el volumen a fin de poder planificar un aprovechamiento racional del recurso mediante un adecuado manejo silvícola (Prodan 1993), y como otros autores que estudiaron el crecimiento del algarrobo blanco en función de la edad han encontrado que una función lineal polinómica de segundo grado ajusta bien la porción sistemática de la variabilidad debida a la edad biológico (Gimenez et al.,2001), para la porción sistemática del modelo de crecimiento de algarrobo negro (*Prosopis nigra*)[79], mientras que (Perpiñal 1993), trabajando para panta negro (*Prosopis flexuosa*), ajustan el crecimiento empleando el modelo no lineal conocido como modelo de (Chapman Richards). Bajo ciertas circunstancias el modelo de Chapman Richards se aproxima al modelo Logístico, el cual también ha sido también utilizado para explicar el crecimiento biológico de numerosas especies arbóreas (Prodan 1993). Se trabajó con datos de 10 individuos adultos de algarrobo blanco, con diámetro a la altura del pecho (medido a 1.30 m del suelo) mayor de 30 cm. Estos fueron mapeados, durante

1997, en tres sitios de la provincia de Santiago del Estero Argentina. El crecimiento de un árbol, en un periodo de tiempo determinado, es el resultado de la influencia de distintos factores: edad del árbol, clima y disturbios (Villalba 1988). Algunos autores trabajando en especies nativas, usan la técnica de suavizado de las series individuales, a los fines de eliminar la variación climática previo a la modelación del crecimiento biológico. Esta técnica separa la señal de interés (señal debida a la edad del árbol), del ruido concomitante proveniente de otras fuentes de variación. La familia de ecuaciones de crecimiento asintótico no lineales es ampliamente utilizada para modelar el crecimiento de especies forestales (Alder 1980). Estas funciones pueden ser utilizadas en su forma integrada (función de productividad o rendimiento) y/o en su forma diferencial (función de crecimiento). A esta familia pertenece la ecuación de Chapman Richards, Otro miembro de la familia es la función Logística.

Con el trabajo de Quesada 2016 [62] cuyo propósito se centra en fortalecer el conocimiento y la prevención de los desastres por deslizamientos y en cuya investigación se desarrolla una metodología que integra la cartografía geomorfológica con la elaboración de mapas de susceptibilidad a deslizamientos usando los sistemas de información geográfica (SIG) y modelando la susceptibilidad por deslizamientos usando la regresión logística múltiple (RLM). Ya que se han hecho pocos estudios que sirvan para modelar y ubicar la distribución espacial de los deslizamientos con el uso de modelos de susceptibilidad para deslizamientos de tierras (Legorreta and Bursik, 2009). En este estudio se integró la cartografía geomorfológica con la elaboración de mapas de susceptibilidad a deslizamientos usando el método de regresión logística múltiple (RLM), esta regresión fue seleccionada porque su evaluación bajo condiciones naturales ha mostrado ser muy acertada para la identificación de laderas donde se han observado deslizamientos, probando ser adecuada si se muestrea estratégicamente y con un tamaño de muestra apropiado y si las variables seleccionadas están fuertemente relacionadas con los deslizamientos (Ohlmacher and Davis, 2003).

en el desarrollo del modelo primero se hace una revisión bibliográfica y se elaboró la cartografía geomorfológica mediante el procesamiento del mapa digital con curvas de nivel cada 10 m, luego se elaboró un modelo de elevación digital del terreno obtenido a partir de mapa topográfico digital del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI), Previo a la aplicación de la regresión logística múltiple (RLM), se calculó la susceptibilidad a

deslizamientos y se cartografió utilizando el programa LOGISNET (Legorreta and Bursik, 2009) y el paquete estadístico SPSS, también se elaboró un inventario histórico de deslizamiento de tierras. En el área de estudio se identificaron más de 100 deslizamientos de tierras con base en el análisis multitemporal, fotos aéreas y trabajo en campo para identificar y describir la distribución espacial de los deslizamientos de tierras. En este caso la función logística estima la probabilidad de que pueda ocurrir o no un acontecimiento, como es el caso de un deslizamiento (Kleinbaum and Klein 2002).

El último paso consistió en comparar el mapa de susceptibilidad de RLM con el mapa del inventario histórico de deslizamientos y observar las diferencias y coincidencias espaciales. El porcentaje de cobertura entre los dos mapas es la medida de cómo el modelo es capaz de identificar con veracidad las áreas con deslizamientos. El método (RLM) indica que la elevación, la pendiente, la dirección del flujo, el uso del suelo, la geología y la curvatura del terreno constituyen los factores más importantes para la generación de deslizamientos en el área de estudio.

En el trabajo de Bornaetxea 2018[83], muestra un mapa de susceptibilidad de deslizamiento que es “una estimación de dónde se espera que ocurran los deslizamientos y en términos matemáticos se puede definir como la probabilidad espacial de ocurrencia de deslizamientos, considerando un conjunto de condiciones geoambientales (Soeters and Westen 1996). En este estudio, se ha aplicado la regresión logística (RL), que establece la relación matemática entre un conjunto de variables explicativas y una variable de respuesta dicotómica, como por ejemplo la presencia o ausencia de deslizamientos. Se ha considerado este método como óptimo, sobre todo cuando se dispone de un conjunto de datos limitado. Además, entre otras ventajas, la RL ofrece la posibilidad de utilizar variables tanto de carácter categórico como continuo, y a su vez no es estrictamente necesario que las variables presenten una distribución normal (Atkinson and Massari 1998). Este trabajo que tiene por fin último desarrollar un mapa de susceptibilidad de deslizamientos a partir de un modelo de RL para una cuenca hidrográfica de Gipuzkoa (Oria), el mapa de inventario de deslizamientos se considera un paso fundamental en cualquier modelo de susceptibilidad, el número de observaciones debe ser lo suficientemente amplio como para cubrir la variabilidad de los parámetros categóricos y continuos en el área de estudio; pero no demasiado extenso para evitar la auto-correlación espacial de los

parámetros de entrada, lo que violaría la suposición de independencia de las observaciones como indican diversos autores (Eeckhaut 2006). En este trabajo, se ha recurrido a la documentación cartográfica y bibliográfica, De esta manera se han inventariado 325 puntos inestables correspondientes a deslizamientos superficiales de tipo rotacional y traslacional (Varnes 1958), Posteriormente, se ha creado una capa de puntos de distribución espacial con la ayuda del software ArcGIS 10.0. Y finalmente, han sido seleccionados aleatoriamente el 20 % de los puntos inventariados en el campo (65 puntos) y han sido separados para el proceso de validación. Para la consecución del trabajo, debido a que la RL requiere un conjunto de datos compuesto por un número casi equilibrado de casos positivos (inestables) y negativos (estable) (Felicísimo 2013), se han seleccionado de forma aleatoria 260 puntos estables utilizando un esquema de muestreo espacialmente uniforme, lo que ofrece diversos resultados que se consideran objetivos y que están relacionados con las decisiones que se han de tomar al inicio de todo proceso de confección de mapas de susceptibilidad de deslizamientos en los que se aplica la RL.

En trabajos relacionados con la evaluación de la susceptibilidad en la subcuenca el Estado Puebla-Veracruz México realizado por Pina 2019 [95], con una metodología que implementa Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis estadístico de Regresión Logística Múltiple (RML). Son utilizados varios elementos para realizar esta investigación, incluyendo mapas digitales con curvas de elevación a 10 m, fotografías aéreas a escalas 1:10 000 y 1:20 000 respectivamente, un Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución de 10 m y, un mapa geológico y otro de uso de suelo, escalas 1:250 000, ambos del INEGI, así como cartas digitales, escala 1:50 000. Esta investigación se realiza a partir de la necesidad que existe, de conocer el comportamiento que tienen los valles fluviales de la subcuenca del río El Estado y otras subcuencas vecinas, respecto a los deslizamientos que ocurren en estos sitios, mediante la generación de cartografía en SINMAP (acrónimo de Stability INdex MAPing). Son definidos los tipos de deslizamientos ocurridos en la subcuenca, evitando la duplicidad o enfoques de otros trabajos (Mora 2012 and Rodriguez 2006). Se colectaron mapas temáticos impresos por el INEGI: geológicos, escala 1:250 000, año 1994 y topográficos, escala 1:50 000, del año 2014; imágenes satelitales LANDSAT, SPOT y ortofotos del INEGI (año 2008, escala 1:10 000) para efectuar una interpretación geomorfológica del área. La primera campaña se realizó en otoño de 2011 con el fin de realizar el inventario de deslizamientos, así como la verificación

de los rasgos del terreno y los deslizamientos con el material cartográfico e interpretación de las ortofotos, La segunda campaña se llevó a cabo en la primavera de 2012 para la recolección de muestras geotécnicas, extrayéndose material (suelo) del escarpe principal, zona que presenta planos de corte definidos; que es distinto al material removido, depositado en el cuerpo o en la zona de evacuación. El material involucrado en los deslizamientos es principalmente suelo, compuesto por Andosol y Regosol, producto de la meteorización física y química del material parental, que pueden incluir clastos de varios centímetros, hasta bloques de más de 2 m y vegetación (herbáceas y pinos de hasta 20 m), que son afectados y forman parte de los depósitos. Se ha detectado de acuerdo con el análisis granulométrico, que todos los deslizamientos presentan el mismo tipo de material (arena mal graduada suelta), Así, esta metodología busca crear un protocolo de evaluación de susceptibilidad y modelos que puedan ser aplicados a otras zonas volcánicas del país con características similares en la topografía, composición y clima

La presente investigación presentado por Villegas 2019 [84], se fundamenta en la búsqueda de una herramienta que de manera práctica y sencilla contribuya a mejorar el estudio de las precipitaciones; el objetivo central de esta investigación gravita en torno al hecho de evaluar series pluviométricas mediante un modelo de regresión logística multinominal con el fin de caracterizar y comparar la información relacionada con la tendencia y estacionalidad de la precipitación mensual proveniente de estaciones meteorológicas asociadas a la cuenca del Río Torbe del estado Táchira, Los datos de esta investigación provienen de una serie de precipitaciones mensuales registradas en la estación San Cristóbal en el periodo 1956-2000. Para la descripción estadística de las variables registradas en la estación se tuvo en consideración el tamaño de la muestra ( $n$ ), años de registro, la media aritmética, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, mínimo, cuartil (Q1), la mediana, cuartil (Q3), los resultados de la regresión logística con tres series de precipitaciones mensuales simuladas provenientes de una distribución Pearson tipo III, Log-Pearson y Gumbel con precipitación, temperatura y humedad como regresoras, mostraron como los estadísticos asociados a la razón de verosimilitud mejoraron conforme se incrementó el tamaño de la muestra, lo que evidenció la consistencia de los estimadores de máxima verosimilitud del modelo logístico en el análisis de series de precipitación mensual.

Un estudio reciente hecho por Josephus O. 2021 [61] referente al virus COVID-19 el cual apareció por primera vez en la ciudad de Wuhan, China, a fines de 2019 y se propaga rápidamente a varios países, (World Health Organization, 2020 and Xu Xw. 2019) y al observar la rapidez con la que se propagó el virus, los científicos de todo el mundo concluyeron que hay tres características clínicas clave, la deshidrogenasa láctica (LDH) , los linfocitos y la proteína C reactiva de alta sensibilidad (hs-CRP) los cuales juegan un papel muy importante en la supervivencia de los pacientes con COVID-19 grave (Yan L. et al.,2020). En este estudio, se utilizó un algoritmo predictivo basado en Inteligencia Artificial (IA) para predecir la muerte de pacientes con COVID-19, dicho algoritmo utilizó características observadas de los pacientes para predecir el riesgo de mortalidad. se trata de un algoritmo de Regresión logística y se describe mediante un modelo matemático que analiza la relación entre una o más variables independientes y una variable dependiente cualitativa (Ohyver M. et al.,2017 and Allison 2012). Lo que la hace tan popular es la función logística, que describe una forma matemática mediante una función extremadamente flexible y fácil de usar (Hosmer D. et al.,2013). La regresión logística se ha utilizado en varios estudios relacionados con COVID-19, como por ejemplo para predecir la cantidad total de personas contagiadas (Batista M. 2020), para modelar la propagación de COVID-19 en China (Shen C. 2020) y para predecir la tendencia de la epidemia de COVID-19 (Cheng, 2017). es importante destacar que la edad del paciente, los intervalo de tiempo de hospitalización, y visita a Wuhan son tomados como predictores.

En su trabajo sobre características hidroquímicas de los cursos fluviales realizado por Toro M. 2002[99], describe el clima y la geología las características ambientales naturales que quizás más influyan en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas fluviales. La composición química del agua de un río va a venir determinada por varios factores concretos: la composición y la cantidad de precipitación caída en la cuenca, la geología de la cuenca y la solubilidad de las rocas o materiales, los suelos, la vegetación terrestre, los procesos de evaporación, los procesos biológicos y, finalmente, la contaminación o vertidos de origen humano. En este sentido, la caracterización hidroquímica de estos ambientes tan fluctuantes y su relación con los factores ambientales que la determinan, como base para un mejor entendimiento de las comunidades y procesos biológicos existentes, ha de ser

prioritaria en los estudios de ecología fluvial a desarrollar. el objetivo principal de este trabajo se enmarca dentro del proyecto GUADALMED (El estado ecológico de los ríos mediterráneos), y comprende el estudio de las variaciones espaciales y temporales de las variables hidrológicas y físico-químicas en los ríos mediterráneos ibéricos así como su relación con las variables ambientales de las cuencas fluviales, precisando cuales de ellas determinan la dinámica y la singularidad de todas las cuencas estudiadas, juntas y por separado. Para poder definir las características naturales de estas variaciones espacio-temporales, el estudio se ha centrado con mayor énfasis en los ríos y/o estaciones de referencia, que presentan unas condiciones ambientales prístinas o muy poco alteradas por la actividad humana (Bonada et al., este volumen). A partir de los resultados obtenidos, se propone una tipología básica para los ríos de las cuencas mediterráneas ibéricas basada en las características hidroquímicas estudiadas.

En el artículo realizado por Daniel M. 2013[100], hace un análisis del comportamiento del oxígeno disuelto (OD) y de la temperatura (T) en el río Medellín, principal cuerpo de agua que forma el Valle de Aburrá en Colombia, Se cuenta con una red de investigación y de estudios denominada Red Río, en la cual participan tanto la autoridad ambiental (Área Metropolitana) como diversas instituciones educativas y de investigación: Universidad de Antioquia, Universidad Pontificia Bolivariana, Universidad de Medellín y Universidad Nacional; Las mediciones realizadas abarcan diferentes variables tales como Oxígeno disuelto (OD), temperatura del agua (T), temperatura del aire en la zona (TA), conductividad, nitrógeno, metales, y presencia de microorganismos, entre otras. se asumirá que el OD de equilibrio o saturación para aguas limpias se define mediante la ley de Henry, que establece el equilibrio entre la presión parcial de oxígeno en la atmósfera y la presión del oxígeno en el agua; la constante de Henry depende de la temperatura del agua. La presión parcial del oxígeno en el aire depende de la presión atmosférica, es decir, de la altura sobre el nivel del mar, si se hace un estudio del comportamiento del OD en una zona de un río cuya altura sobre el nivel del mar se conozca, se puede establecer un comportamiento medio estadístico representativo del OD contra la temperatura y comparar ese comportamiento con la curva de equilibrio. Existe abundante evidencia de que la temperatura de una corriente de agua, bajo condiciones de equilibrio, está relacionada con la temperatura del aire ambiente, entre los diversos estudios, cabe citar la investigación realizada por V. Kothandaraman y R. L. Evans [3] sobre

la relación de temperatura aire- agua para predecir el comportamiento de la temperatura del Rio Illinois, en la que se encuentra que los valores calculados en el modelo de predicción sigue el mismo patrón de los valores reales medidos en el rio.

El trabajo realizado por Mohseni 1998[98], cuyo objetivo es introducir un método para proyectar las temperaturas de la corriente semanal para el clima actual y un escenario climático de  $2 \times CO_2$ , en los estudios de correlación entre las temperaturas de los arroyos y las temperaturas del aire, se obtuvieron muy buenos resultados en escalas de tiempo semanales (Erickson y Stefan, 1996; Pilgrim y Stefan, 1995; Stefan y Preud'homme, 1993). Para la estimación de las temperaturas de los arroyos en función de las variables climáticas, se han desarrollado anteriormente modelos de diferente complejidad y requisitos de entrada de datos, El método más complejo para calcular las temperaturas de las corrientes utiliza un modelo de transporte de dispersión / advección de calor completo (véase, por ejemplo, Stefan et al., 1980; Stefan y Sinokrot, 1993), El segundo método incorpora sólo procesos de transferencia de superficie y utiliza el concepto de temperatura de equilibrio (Edinger et al., 1968; Brown y col., 1971). El tercer grupo de modelos utiliza funciones estacionales (a menudo sinusoidales) de la temperatura de la corriente con respecto al tiempo (Ward, 1963; Kothandaraman, 1971; Hostetler, 1991; Rowe y Taylor, 1994). El último método o el más simple para la estimación de la temperatura de la corriente utiliza una regresión lineal entre la temperatura del aire y la temperatura de la corriente (Johnson, 1971; Song y col., 1973; Crisp y Howson, 1982; Stefan y Preud'homme, 1993). En este artículo se presenta un modelo de regresión novedoso para pronosticar las temperaturas de los arroyos durante todo el año en función de las temperaturas del aire. Luego, el modelo se aplica a 584 estaciones de medición en los Estados Unidos contiguos. Se determinan los parámetros del modelo y la bondad de ajuste. Finalmente, se establecen las limitaciones del modelo.

## 7. Resultados

### 7.1. Toma de la temperatura del agua

Los elementos para la toma de temperatura que se van a utilizar son: una botella de boca ancha y un lazo de longitud larga, los cuales se usaran para extraer el agua de rio de forma segura, se llevará un registro por medio de una tabla de datos donde se recopilara lugar de la muestra, coordenadas, temperatura del Agua y temperatura del Aire, al igual como la hora. Se preparará la calibración del equipo de campo para el análisis “in situ” en este caso, se utilizará un termómetro digital *Medidor Tds de Temperatura Conductimetro Prueba De Calidad Agua*; y por último se tendrá una organización de la logística para la toma de muestreo.



Figura 19: Elementos de trabajo

Llenar el recipiente con una porción de agua del cuerpo hídrico de la parte central del cauce, preferiblemente en dirección opuesta al flujo del agua, tomar la medida de la temperatura del agua tan pronto como sea posible después de haber tomado la muestra de agua, ya que la temperatura tiende a cambiar muy rápidamente una vez que se ha recogido la muestra, luego se hará un registro de localización del punto de muestra real con GPS, esperando una mayor precisión. Un error en la toma de la muestra sería no dejar los instrumentos en el agua el tiempo suficiente para que se establezca la medida, sacar el termómetro del agua con lo que la medida cambia antes de ser leída, y no se debe leer el termómetro al nivel de los ojos.

## 7 RESULTADOS

---

Se tomaron 39 puntos de muestreo en todo el rango del río Quindío los cuales se encuentran distribuidos entre las coordenadas  $4^{\circ}2438N - 75^{\circ}5232E$  y  $4^{\circ}3799N - 75^{\circ}2725E$  los cuales se ubican en la zona norte del departamento del valle del cauca Casablanca con el río la vieja y el norte del departamento del Quindío con el río Quindío en el valle del cócora en Salento Quindío donde se tomaron la temperatura del agua y temperatura del aire en un promedio de horas entre las 11:00 am y 2:00 pm.

El punto de muestreo debe estar en un lugar fácilmente accesible con las vías de acceso vehicular y peatonal que sean necesarias, de tal manera que faciliten obtener la muestra, de igual forma la recolección de las muestras debe ser lo más representativo posible de las características totales del cuerpo de agua, todas las muestras deben ser lo más homogéneo posible.

Los puntos de muestreo deben compartir los mismos parámetros de turbiedad, velocidad y apariencia física del agua las cuales deben ser preferiblemente de la zona central del río o de una zona donde fluya el agua, pero sin turbulencia, se debe de evitar tomar la muestra de las márgenes del río ya que allí el agua puede presentar variaciones de temperatura por los sedimentos o la vegetación riparia.

El punto de muestreo y las condiciones meteorológicas deben garantizar la seguridad de las personas encargadas de tomar la muestra, minimizando los riesgos de accidentes teniendo mayor cuidado en las posibles crecientes, deslizamientos o arrastres de objetos sólidos grandes hacia la corriente.

## 7.2. Aplicación del modelo

El modelo de regresión no lineal de temperatura del Aire/Agua de la subcuenca del río Quindío se aplicó a 7 estaciones de medición del departamento del Quindío, las cuales se encuentran en los municipios de Armenias, Córdoba, Génova, Filandia, Pijao, Salento y Quimbaya. Los datos de temperatura del agua se obtuvieron de documentación suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ), y los datos de temperatura del Aire de los Informes climatológicos con el tiempo por mes, día y hora del sitio web, Weather Spark[104], Un número significativo de puntos de medición también se tomaron in situ en la subcuenta del río Quindío en horas entre las 11:00 a.m y las 2:00 p.m, estas mediciones de la cuenca río Quindío se tomaron para un periodo comprendido entre enero y mayo de 2020 y los datos de temperatura de los arroyos de cada estación de medición se obtuvieron para el período comprendido entre enero de 2014 y diciembre de 2015.

La temperatura máxima del arroyo tomada en las estaciones fue de  $30,7^{\circ}C$  y la temperatura mínima del arroyo en todas las estaciones de medición para el período de estudio fue de  $12,55^{\circ}C$ .

Estación	Tem. media	Tem. minima	Tem. maxima
CRQ	22.0	14.3	30.7
Centro de guadua	21.83	15.61	29.0
El cairo	19.86	14.99	25.8
Bremen	16.52	12.55	22.1
La sierra	17.46	12.68	24.2
La playa	17.38	12.16	24.4
La española	22.30	15.87	30.1

Cuadro 2: Promedio de temperatura anual en las estaciones

### 7.3. Ecuación del modelo

El modelo de regresión no lineal para la estimación de las temperaturas de los arroyos en función de las temperaturas del aire, tiene como fundamento el modelo planteado por Mohseni[98], donde la función utiliza los parámetros  $(\alpha, \gamma, \beta)$  y como señalamos en los objetivos, es una función no lineal de tipo logístico, la cual se describe de la forma:

$$T = \frac{\alpha}{1 + e^{\gamma(\beta - T_a)}} \quad (3)$$

Donde

$T$  : es la temperatura estimada de la corriente

$T_a$  : es la temperatura del aire

$\alpha$  : es la temperatura máxima estimada de la corriente

$\gamma$  es una medida de la pendiente más pronunciada de la función

$\beta$  : representa la temperatura del aire en el punto de inflexión.

Se tomaron 3340 datos de temperatura Aire/Agua, las fuentes de datos obtenidos por la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) y por los Informes climatológicos de Weather Spark[104], se introdujeron en la herramienta Python 3.9.6 para ejecutar el código, usaremos la biblioteca matplotlib en Python para obtener la imagen de la función que se muestra en la *Figura 20*. Y los valores para los parámetros de la función de tipo logístico los cuales son:  $\alpha = 20,6$   $\gamma = 0,1307069698922924$  y  $\beta = 27,1$ . La misma herramienta Python nos arroja un punto de inflexión de coordenadas  $(27,1; 10,3)$  Cuyo código fuente se presentara en los anexos del trabajo.

$$T = \frac{20,6}{1 + e^{0,13070(27,1 - T_a)}} \quad (4)$$

Donde:

$T$  : es la temperatura a estimadar

$T_a$  : es la temperatura del aire

## 7 RESULTADOS

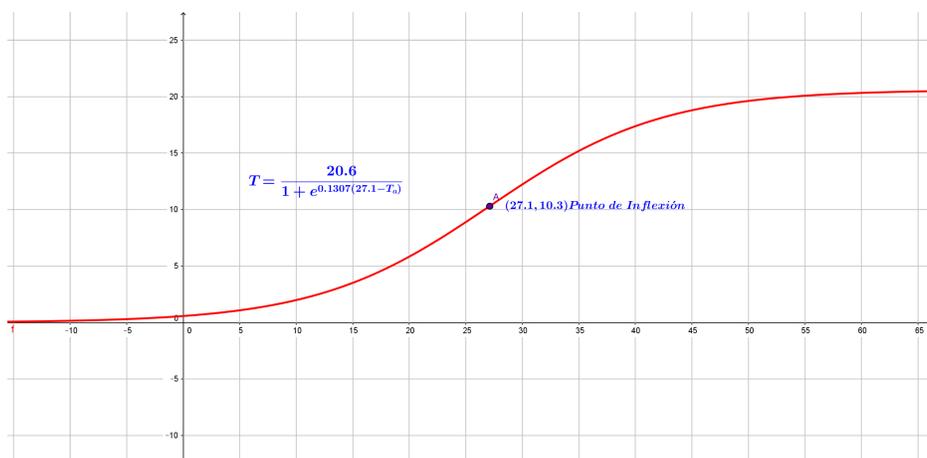


Figura 20: Grafica de la función de tipo logístico

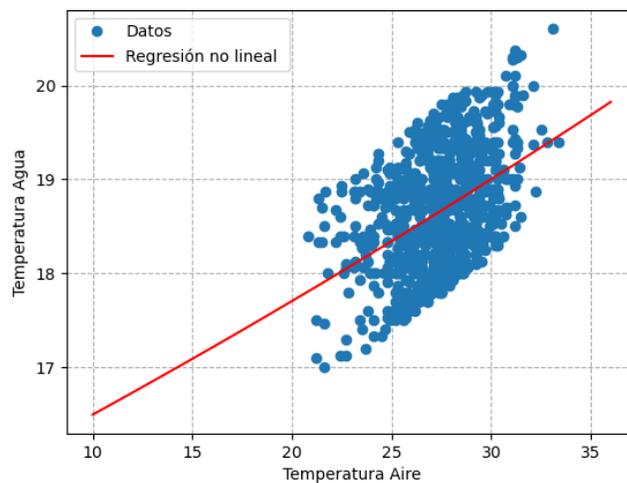


Figura 21: Temperaturas Aire/Agua registradas en la cuenca del río Quindío, para el período 2014-2016, y 2020.

En la *Figura 21* podemos observar la función de tipo logístico con todos los datos de temperatura que se tomaron en la subcuenca río Quindío. Para mejorar el modelo se filtraron datos de temperatura Aire/Agua, ya que en ciertos puntos la temperatura del aire presentaba valores muy altos en

relación con la temperatura del agua, de la misma forma, en ciertos puntos del río se presentaban temperaturas altas con respecto a la medición de la temperatura del aire, lo cual ocasionaba puntos muy alejados en la función.

#### 7.4. Zonas del río Quindío

En la *Figura 22* se muestra la dinámica de la temperatura del agua, en relación con el tiempo en horas del río Quindio obtenida en la regresión. Para ello, se graficaron los valores de temperatura obtenidos con el modelo en  $^{\circ}C$  los cuales en un tiempo comprendido entre 0 y 5 horas inician con una temperatura de entre  $14,5^{\circ}C$  y  $19^{\circ}C$ , en un río con un caudal en promedio de  $5,94m^3/s$ , entre las 10 y 20 horas la temperatura oscila entre  $15,5^{\circ}C$  y  $20^{\circ}C$ , en el rango de 35 a 50 horas hay un descenso entre  $12^{\circ}C$  y  $14^{\circ}C$  para luego mantenerse entre  $13^{\circ}C$  y  $19^{\circ}C$ ,

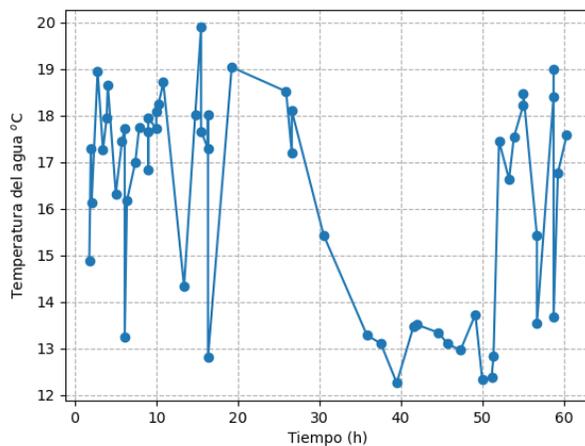


Figura 22: Temperatura del agua estimada en el río Quindio

Es posible identificar tres zonas del río Quindío, que se describen a continuación.

**Zona de producción:** Compreendida entre el nacimiento (4200 msnm) y la parte baja del paraje denominado Valle de Cócora (2000 msnm). El río con un ancho promedio de ocho metros, predominan las aguas claras de poca

profundidad y altas velocidades, que se abren paso a través de bloques de roca que exhiben tamaños hasta de tres metros de diámetro. El agua es apta para el cultivo de la trucha. La temperatura promedio anual es de  $17,7^{\circ}C$  (Estación La Playa) con una oscilación térmica de  $1,5^{\circ}C$  (CRQ, 2003).

**Zona de transporte:** Va desde la parte baja del Valle de Cócora (2000 msnm) hasta el sector de Balboa (1250 msnm). El río presenta un ancho promedio de quince metros, aumenta su profundidad y disminuye la velocidad. La temperatura promedio es de  $20,2^{\circ}C$  (Estación CRQ) con una oscilación térmica de  $1,8^{\circ}C$  (CRQ, 2003). Predominan los monocultivos, en especial café y plátano. Predominan las aguas claras, aunque existen aguas turbias generadas por la descarga de aguas residuales en los sectores de La María, La Florida y El Pescador, zona media del tramo en consideración.

**Zona de sedimentación:** Inicia en el Sector de Balboa (1250 msnm) y culmina con la desembocadura en el río Barragán (1020 msnm), lo que dan origen al río La Vieja el cual tiene un ancho promedio de trescientos metros, en la cual el cauce mantiene un ancho de quince metros. La temperatura promedio es de  $23,5^{\circ}C$  (Estación Centro de la Guadua) con una oscilación térmica de  $0,7^{\circ}C$  (CRQ, 2003). Es normal encontrar aguas claras en la mayor parte del tiempo, la profundidad es moderada, por lo que la velocidad registra un ligero incremento[105].

### 7.4.1. Temperatura promedio del río Roble, Espejo y San Juan

La Subcuenca río Roble, se encuentra enmarcada por los municipios de circasia, Montenegro, Filandia y Quimbaya, es un afluente del río la Vieja. Así mismo la Federación Nacional de Cafeteros capta un total de 64.5 l/s dentro de la Subcuenca del río Roble, donde su mayor concesión se encuentra sobre la quebrada Portachuelo, su temperatura *Figura 23* se mantienen en un rango entre  $11^{\circ}C$  y  $16^{\circ}C$ .

## 7 RESULTADOS

---

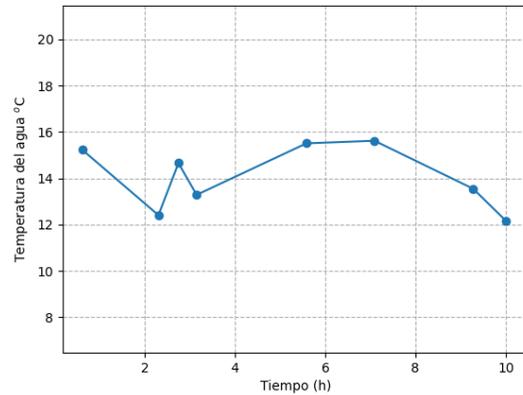


Figura 23: Temperatura de rio Roble

La red meteorológica está compuesta por las estaciones la española ubicada en el municipio de Quimbaya, CRQ, Bremen y vivero Montenegro, el mayor consumo de la Subcuenca se le atribuye a la empresa ESAQUIN con 245 l/s distribuidos en los acueductos de Circasia y Montenegro dentro del cauce principal del rio roble y tributarios a este.

La temperatura en el rio Espejo, *Figura 24*, el cual es un afluente del rio la Vieja se mantiene en un rango entre  $12^{\circ}C$  y  $16^{\circ}C$ .

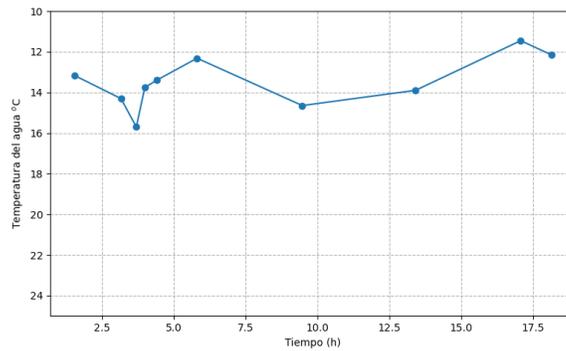


Figura 24: Temperatura de rio Espejo

## 7 RESULTADOS

---

Las temperatura en el rio San Juan, *Figura 25*, el cual es un afluente del rio Barragán y en promedio tiene una temperatura máxima de  $20^{\circ}\text{C}$  y un promedio de temperatura minima de  $15^{\circ}\text{C}$ .

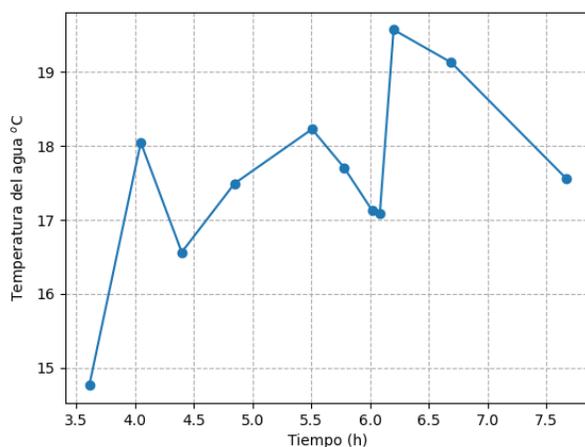


Figura 25: Temperatura de rio san Juan

El departamento del Quindío tiene la mayor demandada de agua proveniente de fuentes superficiales; lo cual se demuestra en la distribución de las concesiones realizadas por la CRQ: un 99.25%  $13,680,48\text{l/s}$  de las concesiones registradas en la Autoridad Ambiental corresponden a fuentes superficiales y solo un 0.75%  $103,11\text{l/s}$  provienen de fuentes subterráneas[101]. Esto implica que la mayor presión por el uso del recurso hídrico recae sobre las masas de agua superficiales.

La mayor cantidad de agua demandada se presenta en Armenia y Calarcá  $3,404,2\text{l/s}$  y  $2,803,4\text{l/s}$ , respectivamente, principalmente para uso hidroenergético y dotación para uso doméstico. Los municipios de Circasia, La Tebaida, Montenegro, y Quimbaya demandan entre  $110,8\text{l/s}$  y  $158,11\text{l/s}$ , el 67% de esta demanda en promedio corresponde al uso doméstico. Salento demanda  $97,94\text{l/s}$ , de los cuales, el 16,9% se requiere para uso doméstico y un 67,8% para uso piscícola. Los municipios de Buenavista, Córdoba, Génova, y Pijao demandan entre  $29,3\text{l/s}$  y  $67,1\text{l/s}$ , cuyo 29,5% y 72,9% de su destinación es para uso agrícola. Filandia debe destinar a la dotación del

## 7 RESULTADOS

---

uso doméstico el 55 % de los 46,02l/s de agua que demanda. Los municipios en los que se proyecta un mayor crecimiento en la demanda de agua son: Armenia incremento de 71,27l/s, La Tebaida incremento de 41,22l/s y Calarcá incremento de 25,23l/s, principalmente para uso doméstico 52,95l/s, 22,28l/s y 34,28l/s, respectivamente y en menor proporción para el uso pecuario[101].

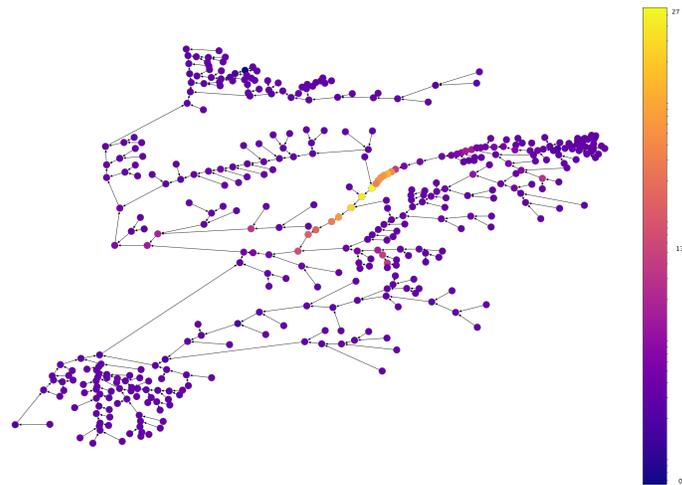


Figura 26: Temperatura total en la red

Podemos observar en la *Figura 26*, que la cuenca río Quindío presenta un incremento en la temperatura del agua en la parte central del río, específicamente desde la estación de monitoreo de la quebrada la maría hasta la intersección entre río verde y el río Quindío. El río Quindío hasta su cuenca media recibe vertimientos directos en su cauce principal del corregimiento de Boquía localizado antes de la bocatoma que surte al acueducto del municipio de Armenia (Bocatoma EPA). Igualmente, recibe vertimientos indirectos de los municipios de Salento, Armenia, Calarcá y Córdoba, a través de las quebradas El Mudo, La Florida, El Cafetero (conocido también como San Nicolás), El Pescador y ríos Santo Domingo y Verde respectivamente. El sector industrial que se ubica en la cuenca del río Quindío y que produce mayores afectaciones sobre el recurso, está compuesto por las curtiembres del sector La María y la Central de Beneficio de Carnes, lo que contribuye al aumento sostenido de la temperatura del agua.

## 8. Conclusiones

Se desarrolló un modelo de regresión no lineal de tipo logístico para estimar las temperaturas del río en función de las temperaturas del aire, la función que se ajustó al modelo (ecuación (3)), conocida como función logística de tipo Gompertz, Weibull, tiene tres parámetros y representa una curva, un parámetro ( $\alpha$ ) especifica las temperaturas máximas diarias del río, los otros dos ( $\gamma$  y  $\beta$ ) son medidas de la pendiente de la función y la temperatura del aire en el punto de inflexión respectivamente. Este modelo se aplicó a 7 estaciones de medición del departamento del Quindío.

Se observa un promedio de temperatura entre  $20^{\circ}C$  y  $27^{\circ}C$  en la parte central del río Quindío, es una zona de transporte que va desde la parte baja del valle del cócora (2000 msnm) hasta el sector de la balboa (1250 msnm), donde predominan los monocultivos de café y plátano con aguas turbias generadas por la descarga de aguas residuales en los sectores de la maría, la florida y el pescador. Se observa la dinámica de la temperatura del agua, en relación con el tiempo en horas del río Quindío, obtenidas en la regresión, el río Quindío tarda 60 horas en recorrer toda la cuenca desde cócora hasta encontrarse con el río barragán y el río vieja. En sus primeras 20 horas de recorrido tiene una temperatura promedio de  $16^{\circ}C$  y  $19^{\circ}C$ , entre zona alta del municipio de salento y parte baja de cócora, en la intersección del río Quindío con el río barragán, se observa una disminución de temperatura que está entre los  $12^{\circ}C$  y  $14^{\circ}C$ , esto se debe a que los afluentes que se encuentran en el río barragán llevan descargas de agua con muy bajas temperaturas, al tener municipios como Génova, Buenavista y Pijao con una población de 16.672 habitantes, en comparación con Armenia, Calarcá y Salento que juntos llegan a tener 388.585 habitantes. El río roble como afluente del río la vieja mantiene una temperatura de  $12^{\circ}C$  y  $16^{\circ}C$ , el río espejo afluente del río la vieja mantiene una temperatura mínima de  $11^{\circ}C$  y una máxima de  $16^{\circ}C$  y el río san juan, afluente del río Barragán mantiene una temperatura de  $14,5^{\circ}C$  y  $20^{\circ}C$ .

La mayor cantidad de agua demandada se presenta en Armenia y Calarcá  $3,404, 2l/s$  y  $2,803, 4l/s$ , respectivamente, principalmente para uso hidro energético y dotación para uso doméstico, Lo que hace que el aumento de temperatura este por encima de los  $20^{\circ}C$  en zonas urbanas del municipio de Armenia Y Calarcá, este aumento de temperatura tambien se debe por las plantas Hidroeléctricas el bosque, la bayona y el campestre ubicadas en

## 8 CONCLUSIONES

---

la zona del Caimo y Calarcá, las cuales tienen sus descargas en el afluente del río Quindío.

El método de regresión no lineal muestra varias ventajas sobre las regresiones lineales simples. Este método es más preciso pero simple. No es necesario obtener los datos de temperatura del aire de las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de medición de los arroyos para estimar la temperatura del mismo. El modelo no se puede aplicar a ríos que no exhiben una relación en forma de S entre las temperaturas del río y las temperaturas del aire, por ejemplo, aguas abajo de algunos embalses o donde los flujos de entrada de agua subterránea o efluentes de aguas residuales influyen en el caudal y la temperatura del arroyo.

## 9. Anexos

Nodos	coordenadas N,W	Temp. de agua	Temp. del aire	Lugar
01	4°24'38" N, -75°52'32" E	26.5	27.5	Casa blanca
02	4°20'15" N, -75°47'32" E	25.9	29.1	Barragan
03	4°22'1" N, -75°46'32" E	27.4	28.4	Cai río barragan
04	4°24'14" N, -75°44'12" E	26.8	27.9	Balneario
05	4°24'15" N, -75°43'31" E	25.2	27.3	Río sto domingo
06	4°29'12" N, -75°41'59" E	26.3	26.6	Calarca-caimo
07	4°32'1" N, -75°39'44" E	25.9	24.4	La maria
08	4°34'21" N, -75°37'57" E	24.3	24.7	Via chaguala
09	4°35'49" N, -75°37'33" E	23.8	23.2	San juan
10	4°38'34" N, -75°35'4" E	23.0	24.4	Parador la isla
11	4°38'35" N, -75°35'3" E	20.0	25.9	Río Quindío
12	4°38'39" N, -75°35'2" E	18.0	27.3	Río Quindío
13	4°38'41" N, -75°35'2" E	18.5	29.9	Río Quindío
14	4°38'43" N, -75°35'1" E	18.1	28.7	Río Quindío
15	4°38'45" N, -75°34'31" E	19.0	29.3	Queb santa rita
16	4°38'49" N, -75°34'41" E	19.7	29.8	Río Quindío
17	4°38'50" N, -75°34'46" E	19.9	27.2	Río Quindío
18	4°38'51" N, -75°34'44" E	18.2	25.8	Río Quindío
19	4°38'52" N, -75°34'43" E	18.8	24.2	Río Quindío
20	4°38'53" N, -75°34'20" E	18.3	24.0	Río Quindío
21	4°38'55" N, -75°32'59" E	17.9	25.9	Río Quindío
22	4°38'59" N, -75°32'46" E	17.4	27.3	Río Quindío
23	4°38'62" N, -75°32'34" E	18.8	29.2	Río Quindío
24	4°38'64" N, -75°32'31" E	17.6	28.1	Río Quindío
25	4°38'66" N, -75°32'34" E	15.1	25.6	puente río la vieja
26	4°38'71" N, -75°29'51" E	14.8	23.2	Río Quindío
27	4°38'87" N, -75°29'13" E	14.6	22.5	Truchera
28	4°38'92" N, -75°29'12" E	13.9	22.8	Río Quindío
29	4°37'49" N, -75°28'35" E	13.5	23.0	Río Quindío
30	4°37'50" N, -75°28'39" E	13.3	23.4	Río Quindío
31	4°37'68" N, -75°28'41" E	13.1	23.6	Río Quindío
32	4°37'71" N, -75°28'49" E	12.7	22.8	Río Quindío
33	4°37'88" N, -75°27'55" E	12.3	21.9	Río Quindío
34	4°37'91" N, -75°27'51" E	12.0	22.1	Río Quindío
35	4°37'93" N, -75°27'46" E	11.8	21.6	Río Quindío
36	4°37'95" N, -75°27'35" E	12.1	23.5	Río Quindío
37	4°37'97" N, -75°27'33" E	12.6	27.8	Río Quindío
38	4°37'98" N, -75°27'29" E	12.5	25.7	Río Quindío
39	4°37'99" N, -75°27'25" E	12.3	24.4	Cocora

Cuadro 3: Tabla de temperaturas tomadas insitu



(a) Cocora



(b) Río Quindío



(c) Río la Vieja



(d) Río Santo Domingo



(e) Río Quindío



(f) Río Santo Domingo



(g) Río Quindío



(h) Estación Calarca



(i) Valle del Cocora



(j) Curtiembre La María

# 9 ANEXOS

		TEMPERATURA ENERO (°C) 2014																																	
Estación	Municipio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	TOTAL		
CRG	Armenia	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN
Centro de la Guadalupe	Cordoba	20.8	24.8	24.6	22.7	28.0	33.7	21.7	24.1	27.8	27.7	23.3	26.1	24.2	23.1	20.9	23.3	22.7	23.3	22.3	22.7	23.7	24.7	23.7	23.3	22.7	22.7	22.7	23.7	24.7	24.7	23.3	23.0	23.2	
El Cairo	Gánuza	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	
Erasmán	Fiapa	16.60	15.93	16.13	17.47	18.73	14.93	15.29	16.27	15.60	15.00	16.00	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	
La Sierra	Piapo	18.00	22.07	18.33	18.47	17.67	17.67	17.33	17.40	15.47	17.47	18.33	18.40	17.47	18.40	18.00	17.47	15.33	16.20	16.47	16.07	16.33	16.67	15.93	15.00	17.00	17.67	17.33	17.73	17.73	17.77	17.47	18.13	17.4	
La Playa	Salento	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN
La Española	Quimbaya	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN	IN

NO SE REALIZÓ LECTURA IN COMPLETA

Figura 27: Temperatura de estaciones 2014



## 9.1. Código fuente de el software para la simulación

### 9.1.1. Programa para generar el modelo de regresión Logística

```
#!/usr/bin/env python2
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Fri Sep 10 15:44:29 2021

@author: Alejandro
"""
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

def regLineal(x,y):
    ## y = b_0 + b_1*x

    # number of observations/points
    n = np.size(x)

    # mean of x and y vector
    m_x, m_y = np.mean(x), np.mean(y)

    # calculating cross-deviation and deviation ↵
    about x
    SS_xy = np.sum(y*x) - n*m_y*m_x
    SS_xx = np.sum(x*x) - n*m_x*m_x

    # calculating regression coefficients
    b_1 = SS_xy / SS_xx
    b_0 = m_y - b_1*m_x

    return(b_0,b_1) ## el primero es el intercepto ↵
    y el segundo es la pendiente
```

```
def linea(x,b,m):
    return m*x+b

def logifunc(x,alpha,gamma,beta):
    return alpha/(1 + np.exp(gamma*(beta-x)))

matriz=np.genfromtxt('matriz.csv', delimiter=' ')
y=np.array(matriz[:,1]) #agua
x=np.array(matriz[:,0]) #aire

print(matriz)

alpha=np.max(y)
gamma=regLineal(x,y)[1]
beta=np.min(x) + (np.max(x)-np.min(x))/2.0

popt, pcov = curve_fit(logifunc, x, y, p0=[alpha,
gamma,beta], maxfev=800)
# pop, pcov = curve_fit(logifunc, x, y, p0=[alpha,
, gamma, beta])
print(popt)

x_data = np.linspace(10.0,35.0+1.0,num=100)
print(logifunc(x_data, *popt))

b,m=regLineal(x,y)

plt.plot(x,y,"o", label='Datos')
plt.plot(x_data, logifunc(x_data, *popt), label='↔
Regresion No lineal')
```

```
plt.plot(x_data, linea(x_data, b,m), label='↵  
Regresion_lineal')  
  
plt.xlabel('x')  
plt.ylabel('y')  
plt.legend()  
plt.grid(linestyle="dashed")  
plt.show()
```

### 9.1.2. Programa para generar la simulación en la red

```
#!/usr/bin/env python2  
# -*- coding: utf-8 -*-  
"""  
Created on Sat Jul 29 14:38:38 2021  
  
@author: Alejandro  
"""  
  
import networkx as nx  
import numpy as np  
from scipy import integrate  
import matplotlib.pyplot as plt  
from time import time  
  
def Segundos2Horas(x):  
    return x/3600.0  
  
def RegLogisticoV1(ta): # tramofinal  
    y=19.05896/(1+19714.7307*np.exp(-0.47748*ta))  
    return y  
  
def RegLogisticoV2(ta): # tramomedio  
    y=28.05917/(1+40.29617*np.exp(-0.23073*ta))  
    return y
```

```
def RegLogisticoV3(ta): # tramoinicial
    y=13.1807/(1+2.54772*np.exp(-0.14598*ta))
    return y

def neighborsIn(G, v):
    lista=[]
    for i in G.in_edges(v):
        lista.append(i[0])
    return lista

def VertimientoEnNodo(N, Mu, d):
    global G
    G.node[N]["weight"]=np.random.normal(Mu,d)

def ReiniciaNacimientos():
    global G
    for i in G.nodes(): # con todos los nodos ↵
        inicializamos la temp del agua
        G.node[i]["TempAgua"]=np.random.normal↵
            (16.673, 1.0)

    for i in G.nodes():# con todos los nodos ↵
        inicializamos la temp del aire
        G.node[i]["TempAire"]=np.random.normal↵
            (25.713, 1.0)

    for i in tramoinicial: ### llenaos la ↵
        tempertura del tramo inicial del agua
        G.node[i]["TempAgua"]=np.random.normal↵
            (12.2166, 1.0)

    for i in tramoinicial: ### llenaos la ↵
```

```
    temperatura del tramo inicial del agua
    G.node[i]["TempAire"]=np.random.normal←
        (24.1833, 1.0)

for i in tramomedio:    ### llenaos la ←
    temperatura del tramo inicial del agua
    G.node[i]["TempAgua"]=np.random.normal←
        (25.51, 1.0)

for i in tramomedio:    ### llenaos la ←
    temperatura del tramo inicial del agua
    G.node[i]["TempAire"]=np.random.normal←
        (26.35, 1.0)

def segToDias(seg):
    dias = float(seg)/86400.0
    return dias

def f(alpha, t):
    k=0.1
    total=alpha*np.exp(-k*t)
    return total

G = nx.DiGraph()

archivo = open("red.csv", "r")
for linea in archivo.readlines():
    k=linea.split()
    i=int(k[0])
    j=int(k[1])
    Li=float(k[2])
    Ori=int(k[3])
    Vi=float(k[4])

    G.add_edge(i,j, L=Li, V=Vi, Ord=Ori)
```

```
ListaNacimientos=[]
listaNoNacimientos=[]

for i in G.nodes():
    if neighborsIn(G,i)==[]:
        ListaNacimientos.append(i)
    else:
        listaNoNacimientos.append(i)

NAristas=G.number_of_edges()
NNodos=G.number_of_nodes()

print("Numero de Nodos:", NNodos)
print("Numero de aristas:", NAristas)

##### crear el diccionario
ind = {}

for i in G.edges():
    h=i[0]
    k=i[1]
    ind[G[h][k]["Ord"]] = i ##### se llena el ←
    diccionario

arch = open('tramoinicial.txt', 'r')

tramoinicial=[]
for linea in arch:
    tramoinicial.append(int(linea))
arch.close()

arch = open('tramomedio.txt', 'r')
tramomedio=[]
for linea in arch:
    tramomedio.append(int(linea))
arch.close()
```

```
# inicializamos todos los nodos con temperatura ↵  
aleatoria  
  
for i in G.nodes(): # con todos los nodos ↵  
inicializamos la temp del agua  
    G.nodes[i]["TempAgua"]=np.random.normal(18.5, ↵  
        1.5)  
  
for i in G.nodes():# con todos los nodos ↵  
inicializamos la temp del aire  
    G.nodes[i]["TempAire"]=np.random.normal(26.0, ↵  
        1.5)  
  
for i in tramoinicial: ### llenaos la temperatura ↵  
del tramo inicial del agua  
    G.nodes[i]["TempAgua"]=np.random.normal↵  
        (12.2166, 1.5)  
  
for i in tramoinicial: ### llenaos la temperatura ↵  
del tramo inicial del agua  
    G.nodes[i]["TempAire"]=np.random.normal↵  
        (20.1833, 1.5)  
  
for i in tramomedio: ### llenaos la temperatura ↵  
del tramo inicial del agua  
    G.nodes[i]["TempAgua"]=np.random.normal↵  
        (25.51, 1.5)  
  
for i in tramomedio: ### llenaos la temperatura ↵  
del tramo inicial del agua  
    G.nodes[i]["TempAire"]=np.random.normal↵  
        (26.35, 1.5)
```

```
####-----
Iteraciones=200

Nodo=303 ###Nodo de estudio
#Nodo=73
print("Nodo:□□", Nodo)

vec=[] #### para cantidad los Temp

ListaGraficaTiempo=[] # la grafica que vamos a ←
realizar con tiempo
ListaGraficaValor=[] # la grafica que vamos a ←
realizar con el valor
tempt=0.0 #variable temporal de tiempo en horas

#### para calcular las aristas que van a ser el ←
recorrido
listaNodos=[0, 2, 4, 6, 8, 12, 14, 16,
            30,404,34,38,40,42,46,48,406,
            50,407,408,60,409,64,66,69,
            410,411,412,413,425,414,427,
            426,415,424,71,417,73,418,419,
            420,421,141,145,422,146,295,299,
            329,333,337,341,343,373,377,393,
            395,401, 403]

ListaDeAristas=[]

for i in range(len(listaNodos)-1):
    ListaDeAristas.append((listaNodos[i],←
                           listaNodos[i+1]))

ListaGraficaTiempo=[]
```

```
listaSola=[]

tiempo_inicial = time()

for i in ind:
    h= ind[i][0]
    k= ind[i][1]

    ti=(G[h][k]["L"])/G[h][k]["V"]

    tempAguaTemporal=0.0

    if h in tramoinicial:
        tempAguaTemporal = RegLogisticoV3(G.nodes[h]↔
            ["TempAire"])
        G.nodes[k]["TempAgua"] = (G.nodes[k]["↔
            TempAgua"] + tempAguaTemporal)/2.0
    else:
        if h in tramomedio:
            tempAguaTemporal = RegLogisticoV2(G.nodes↔
                [h]["TempAire"])
            G.nodes[k]["TempAgua"] = (G.nodes[k]["↔
                TempAgua"] + tempAguaTemporal)/2.0

        else:
            tempAguaTemporal = RegLogisticoV1(G.nodes↔
                [h]["TempAire"])
            G.nodes[k]["TempAgua"] = (G.nodes[k]["↔
                TempAgua"] + tempAguaTemporal)/2.0

    if (h,k) in ListaDeAristas:
        tempt=tempt+ti
        ListaGraficaTiempo.append(Segundos2Horas(↔
            tempt))
```

```
        ListaGraficaValor.append(G.nodes[k]["↵
            TempAgua"])
        listaSola.append((h,k))

tiempo_final = time()

tiempo_ejecucion = tiempo_final - tiempo_inicial

print('El tiempo de ejecucion fue:', ↵
      tiempo_ejecucion, 'seg↵o↵', tiempo_ejecucion↵
      /60.0, "minutos" ) #En segundos

MediaCol=np.mean(vec)
print("El promedio es:", MediaCol)

plt.xlabel("Tiempo (h)")
plt.ylabel(u"Temperatura del agua $^o$C")
plt.grid(linestyle="dashed")
plt.plot(ListaGraficaTiempo, ListaGraficaValor, "o↵
        -", label="EDP")
```

## Referencias

- [1] Los caudales ecológicos: herramienta fundamental en la gestión integral de las fuentes hídricas del Quindío. Bustamante, Cesar and Monsalve, Elkin and García, Pedro. Revista de Investigaciones Universidad del Quindío. vol 17. pag 205-221. 2007.
- [2] Elaboracion de un plan de manejo ambiental para la conservacion de la sub cuenca del Rio San Pablo en el canton La Mana, provincia de Cotopaxi. Ibañez Esquivel, Gabriela Maritza. 2012.
- [3] Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad del agua. Jiménez, Antonio Aznar. Revista interdisciplinar de gestión ambiental. vol 2. num 23. pag 12-19. 2000. publi, Wolters Kluwer.
- [4] Dynamics of the seagrass *Zostera noltei* in a shallow Mediterranean lagoon exposed to chemical contamination and other stressors. Estuarine, Coastal and Shelf Science. vol 222. pag 1-12. 2019. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771418306097>. Diane Espel and Noël J. Diepens and Olivier Boutron and Evelyne Buffan-Dubau and Yves Chérain and Eric Coulet and Patrick Grillas and Anne Probst and Jérôme Silvestre and Arnaud Elger. Seagrass dynamics, Multiple stressors, Coastal lagoon, Chemical contaminants.
- [5] Effects of mass transfer on heat and mass transfer characteristics between water surface and airstream. Gu, LD and Min, JC and Tang, YC. International Journal of Heat and Mass Transfer. vol 122 pag 1093-1102. 2018. Elsevier.
- [6] Riparian forest as a management tool for moderating future thermal conditions of lowland temperate streams. Kristensen, Peter Brinkmann and Kristensen, Esben Astrup and Riis, Tenna and Baisner, Anette Jagerfeldt and Larsen, Soren Erik and Verdonschot, PFM and Baattrup-Pedersen, A. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. vol 10. num 5. pag 6081-6106. 2013. Copernicus GmbH.
- [7] Dynamics of a waterborne pathogen model under the influence of environmental pollution. Sandeep Sharma and Nitu Kumari. Applied Mathematics and

## REFERENCIAS

---

- Computation. vol 346. pag 219-243. 2019. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009630031830910X>. Waterborne diseases, Environmental pollution, Persistence, Backward bifurcation, Stability.
- [8] Hematological and intestinal health parameters of rainbow trout are influenced by dietary live yeast and increased water temperature. *Fish and Shellfish Immunology*. vol 89. pag 525-536. 2019. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1050464819302852>. David Huyben and Aleksandar Vidakovic and Henrik Sundh and Kristina Sundell and Anders Kiessling and Torbjörn Lundh. Blood biochemistry, Gene expression, Heat stress, Histology, qPCR, Salmonids.
- [9] Fernández Cirelli, Alicia. El agua: un recurso esencial. 2012. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>
- [10] La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. Escobar, Jairo. 2002. CEPAL.
- [11] Surface Water Pollution. D.B. Walker and D.J. Baumgartner and C.P. Gerba and K. Fitzsimmons. Mark L. Brusseau and Ian L. Pepper and Charles P. Gerba. *Environmental and Pollution Science (Third Edition)*. Academic Press. Third Edition. pag 261-292. 2019. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128147191000161>. Lakes, Rivers, Estuaries, Marine, Coastal zone, Sediment, Eutrophication, Suspended solids, BOD, Dilution.
- [12] <https://www.elagoradiario.com/agorapedia/10-paises-mayores-reservas-agua-dulce/>
- [13] Caissie, Daniel. El régimen térmico de los ríos: una revisión. *Biología de agua dulce*. Wiley Online Library. vol 51, pág 1389-1406, 2006.
- [14] El cambio climático y la acuicultura: repercusiones potenciales, adaptación y mitigación, De Silva, Sena S and Soto, Doris, Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura: visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos. Documento técnico de pesca y acuicultura, vol, 530. 2012.
- [15] Fernández Cirelli, Alicia. El agua: un recurso esencial, año 2012, revista *Química Viva*, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=>

## REFERENCIAS

---

- 86325090002, El agua es esencial para la vida y para el desarrollo de las sociedades.
- [16] El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. A.Chavez and Jimenez and D.Gonzalez and Zeas. revista iberoamericana del agua. vol 2. pag 4. 2015. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931018310652>.
- [17] Assessing the environmental impacts of freshwater thermal pollution from global power generation in LCA. Catherine E. Raptis and Justin M. Boucher and Stephan Pfister. Science of The Total Environment. vol 580. pag 1014-1026. 2017. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716327425>.
- [18] Fernández Cirelli, Alicia. El agua: un recurso esencial. 2012. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>.
- [19] Characteristics of groundwater pollution in a vegetable cultivation area of typical facility agriculture in a developed city. Ecological Indicators. 2018. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X18308343>. Yan Ma and Zhen-Hai Liu and Bei-Dou Xi and Xiao-Song He and Qun-Liang Li and Yan-Jie Qi and Meng-Ye Jin and Yi Guo. Facility agriculture, Groundwater, Dissolved organic matter (DOM), Heavy metals, Perfluorinated compounds.
- [20] Hester, Erich T. and Doyle, Martin W. Human Impacts to River Temperature and Their Effects on Biological Processes: A Quantitative Synthesis. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. vol 47. pag 571-587. climate change, global warming, stream ecology, river ecology, thermal, mitigation, fish, invertebrate. 2011. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.2011.00525.x>
- [21] Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos. Durán, Luis Eduardo Gualdrón. Dinamica ambiental. num 1. pag 83-102. 2016.
- [22] Caracterización jerárquica de los ríos españoles. Propuesta de tipología de tramos fluviales para su clasificación atendiendo a la directiva marco

## REFERENCIAS

---

- del agua, del Tánago, Marta González and de Jalón, Diego Garcia, *Limnetica*, vol,25 num 3-4, pag 81-98, 2006.
- [23] Importancia de los ríos en el entorno ambiental. Díaz, Honorio Campoblanco and Torres, Julia Gomero. *Revista del instituto de investigación de la facultad de geología, minas, metalurgia y ciencias geográficas*. vol 3. num 5. pag 57-63. 2000.
- [24] ECOGIS:  
ENFOQUE COMO HERRAMIENTA HIDROINFORMATICA PARA LA CONSULTA DE CAUDALES ECOLOGICOS Y CIRCULANTES EN LA CUENCA DEL RIO QUINDIO. Sandoval, Gabriel Lozano and Mejía, Cesar Augusto Rodríguez and Triviño, Héctor Javier and others. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*. vol 26. num 1. pag 11-18. 2014.
- [25] The modeling of the formation of technogenic thermal pollution zones in large reservoirs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. vol 126. pag 342-352. 2018. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931018310652>. T. Lyubimova and A. Lepikhin and Ya. Parshakova and Yu. Lyakhin and A. Tiunov.
- [26] Gallego, Lina María and Pérez, Johana. Modelación de la calidad del agua río Quindío municipios de Salento, Armenia, Calarcá y La Tebaida, departamento del Quindío. 2015. <https://bit.ly/2GcBk2h>.
- [27] Estimación de la demanda de agua. Gonzalez, MARÍA CARMENZA and Saldarriaga, G and Jaramillo, OMAR. IDEAM, Estudio Nacional del Agua. cap 5. pag 173. 2010.
- [28] Thermal pollution: general effects and effects on cellular membranes and organelles in particular. Meyer-Rochow, Victor Benno. *Exploring themes on aquatic toxicology*. Research Signpost Publishing, Trivandrum. pag 1-34. 2013.
- [29] Hidrología. Bejár, Máximo Villón. 2004. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [30] La importancia de los ríos como corredores interurbanos. Gastezzi-Arias, Paola and Alvarado-García, Virginia and Pérez-Gómez, Gabriela. *Biocenosis*. vol 31. num 1-2. 2017.

## REFERENCIAS

---

- [31] Texto básico de hidrología. Gamez Morales, William Ramón. 2010. Universidad Nacional Agraria.
- [32] <https://historiadelavida.editorialaces.com/wp-content/uploads/2017/04/molecula-del-agua.png>
- [33] <https://2.bp.blogspot.com/-FVcAPhUba-I/VOH2N-Th6LI/AAAAAAAAALM/-oQh6fbojPosPn08IpJsvwW1KkKQ6V9BACLcB/s1600/1.png>
- [34] [https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRtK0toj7qPnZb6tMCWWQRHCiniIjvDdGm-L76l03iBydZeFQrdGhQIHsLIJ\\_plo0CLU3s&usqp=CAU](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRtK0toj7qPnZb6tMCWWQRHCiniIjvDdGm-L76l03iBydZeFQrdGhQIHsLIJ_plo0CLU3s&usqp=CAU)
- [35] [https://www.todacolombia.com/imagenes/departamentos-de-colombia/Quindio/Mapa\\_hidrografia\\_departamento\\_del\\_Quindio.jpg](https://www.todacolombia.com/imagenes/departamentos-de-colombia/Quindio/Mapa_hidrografia_departamento_del_Quindio.jpg)
- [36] Criterios y consideraciones en estudios de viabilidad de embalses. Lozano, Gabriel and García, Pedro L and Monsalve, Elkin A. Revista de Investigaciones de la Universidad del Quindío. vol 21. pag 9-21. 2010.
- [37] Corporación Autónoma Regional del Quindío. Plan de manejo subcuenca río Quindío. 2011. CRQ.
- [38] Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103-105. Hernández, C. 2007. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- [39] La estructura de redes complejas: teoría y aplicaciones, Estrada, Ernesto, 2012, Prensa de la Universidad de Oxford.
- [40] Detección de comunidades en redes complejas, Aldecoa García, Rodrigo, 2013, Universitat Politècnica de València
- [41] [http://3.bp.blogspot.com/D9lgv1ErFJg/UT0bKZ\\_QeI/AAAAAAAAAD4/hsgSpf7onkY/w1200-h630-p-k-no-nu/6-Puentes+de+K%C3%B6nigsberg.jpg](http://3.bp.blogspot.com/D9lgv1ErFJg/UT0bKZ_QeI/AAAAAAAAAD4/hsgSpf7onkY/w1200-h630-p-k-no-nu/6-Puentes+de+K%C3%B6nigsberg.jpg)
- [42] <http://micaminomaster.com.co/grafos-algoritmo/historia-teoria-grafos/>

## REFERENCIAS

---

- [43] La estructura de redes complejas: teoría y aplicaciones, Estrada, Ernesto, 2012, Oxford University Press.
- [44] Wu, X. W., Li, L., and Qu, Y. G. (2013). Modelling and analysis of river networks based on complex networks theory. In *Advanced Materials Research*, volume 756, pages 2728–2733. Trans Tech Publ.
- [45] Introducción a las redes complejas, El modelo del mundo pequeño, Cano, Niber Rojas, *Revista Entornos*, vol.31, num 2, pag 60-64, 2018, Universidad Surcolombiana
- [46] Redes complejas, Aldana, Maximino, Recuperado a partir de <http://www.fis.unam.mx/~max/English/notasredes.pdf> 2006
- [47] Wasserman, Stanley; Faust, Katherine (2013) [1994]. *Análisis de redes sociales: Métodos y aplicaciones*. Madrid: Centro de Investigaciones Sociológicas. ISBN 978-84-7476-631-8. OCLC 871814053
- [48] *Transferencia de calor*. Valadez, José Ángel Manrique. 2002. Oxford University Press.
- [49] <https://eucbeniki.sio.si/fizika9/184/184-5b.png>
- [50] <https://twenergy.com/wp-content/uploads/2020/06/destruccion-capas-de-ozono.jpg>
- [51] <https://saaccionasostenibilidad.blob.core.windows.net/media/567428/deshielo-polo-norte.png>
- [52] <https://content.gnoss.ws/imagenes/Usuarios/ImagenesCKEditore39dea24-3293-4ccc-971a-48f63fc6c932/645539be-17a2-43a5-b033-16577fe016d6.jpg>
- [53] <https://www.sostenibilidad.com/media/815267/infografia-que-pasa-si-aumenta-la-temperatura-del-planeta.jpg>
- [54] Elementos para formular una gestión integrada del recurso hídrico. Caso cuenca río Quindío. Reinoso, Pedro León García and Neira, Nelson Obregón. *Revista de Tecnología-Journal of Technology*. vol 10. pag 73. 2011.

## REFERENCIAS

---

- [55] Análisis de la evidencia generada por el cambio climático regional en la cuenca del Río Quindío. García, PL. Armenia: Grupo CIDERA. Programa de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Vicerrectoría de Investigaciones. Universidad del Quindío. 2007.
- [56] Hidrodinámica y calidad del agua: modelado de ríos, lagos y estuarios. Ji, Zhen-Gang. 2017. John Wiley and Sons.
- [57] Chevalier et al. 2007; Harleman y Stolzenbach 1972; Langford 1990.
- [58] Chitarroni, Horacio (2002), “La regresión logística“, IDICSO.
- [59] Cornfield J, Gordon T, Smith WN, “Curvas de respuesta cuántica para variables no controladas experimentalmente“. Bull Int Statist Inst 1961;38:97-115.
- [60] López Roldan, Pedro, Fachelli, Sandra, 2016, “Análisis de regresión logística, Metodología de la investigación social cuantitativa“, Universidad Autónoma de Barcelona.
- [61] Bernhard O. Josephus, Ardianto H. Nawir, Evelyn Wijaya, Jurike V. Moniaga, Margaretha Ohyver. (2021), “Predecir la mortalidad en pacientes infectados con el virus COVID-19 según las características observadas del paciente mediante regresión logística“, Procedia Computer Science, 5th International Conference on Computer Science and Computational Intelligence 2020,
- [62] José Fernando Aceves Quesada, Gabriel Legorreta Paulín, José Lugo Hubp, Juan Umaña Romero, Héctor Alfredo Legorreta Cuevas.
- [63] Organization WH. “Laboratory Testing for Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) in Suspected Human Cases: Interim Gui“. World Health Organization; 2020.
- [64] Xu XW, Wu XX, Jiang XG, Xu KJ, Ying LJ, Ma CL, et al. “Clinical Findingd in a Group of Patients Infected with the 2019 Novel Coronavirus“ (SARS-Cov-2) Outside of Wuhan, China: Retrospective Case Series. BMJ. 2020 February
- [65] Yan L, Zhang HT, Xiao Y, Wang W, Guo Y, Sun C, et al. “Prediction of Survival For Severe Covid-19 Patients with Three Clinical Features:

## REFERENCIAS

---

- Development of A Machine Learning-Based Prognostic Model with Clinical Data in Wuhan“. medRxiv. 2020.
- [66] Ohyver M, Moniaga JV, Yunidwi , Restisa K, Setiawan MII. “Logistic Regression and Growth Charts to Determine Children Nutritional and Stunting Status: A Review“. In *Procedia Computer Science*; 2017; Denpasar. p. 232-241.
- [67] Allison PD. “Logistic regression using SAS: Theory and application“. 2nd ed.: SAS Institute; 2012.
- [68] Hosmer DW, Lemeshow S, Sturdivant RX. “Applied Logistic Regression“. 3rd ed.: John Wiley y Sons; 2013.
- [69] Shen CY. “Logistic Growth Modelling of COVID-19 Proliferation in China and Its International Implications“. *International Journal of Infectious Diseases*. *International Journal of Infectious Diseases*. 2020 July; 96.
- [70] Batista M. “Estimation of the final size of the coronavirus epidemic by the logistic“. medRxiv. 2020 February.
- [71] Li J, Cheng K, Wang S, Morstatter F, Trevino RP, Tang J, et al. Feature Selection: A Data Perspective. *ACM Comput Surv*. 2017 December.
- [72] Legorreta, P. G., M. Bursik, Ramírez-Herrera, M. T. Contreras, T. Polenz, M. Lugo-Hubp, J. Paredes-Mejía and L. M. Arana-Salinas (2013), “Landslide inventory mapping and landslide susceptibility modeling assessment on the SW flank of Pico de Orizaba volcano, Puebla-Veracruz, Mexico”. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 57, núm. 3, pp. 371-385.
- [73] Ohlmacher, G. C. y J. C. Davis (2003), “Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA”, *Engineering Geology*, núm. 69, pp. 331–343.
- [74] Legorreta, P. G. y M. Bursik (2009) “Assessment of landslides susceptibility: LOGISNET: a tool for multimethod“, multilayer slope stability analysis, VDMVerla y Dr. Müller, EE.UU., 360 pp.

## REFERENCIAS

---

- [75] Kleinbaum, D. G. y M. Klein (2002) "Logistic Regression: A Self-learning Text", segunda edición, Springer, Nueva York, 513 pp.
- [76] Perpinal, E.; Balzarini, M.; Pietrarelli, L. y Catalán; L. (1993). Crecimiento de *Prosopis flexuosa* en montes naturales del Chaco árido". Modelización sobre series temporales de ancho de anillos de crecimiento. VII Jornadas Técnicas Ecosistemas Forestales nativos. Uso, Manejo y Conservación. Actas I. Misiones.
- [77] Prodan, M. (1993). Discurso pronunciado en la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia. Publicado en la Revista Quebracho(4):51-55.
- [78] Gimenez, Ana M., Ríos N., Moglia G., Hernández P. y Bravo S. (2001). Estudio de magnitudes dendrométricas en función de la edad en *Prosopis alba* Griseb., Algarrobo blanco, Mimosaceae. Revista Forestal Venezolana. 45(2): 175-183
- [79] Gimenez, A; G. Moglia; P. Hernández y S. Bravo.(2000). Leño y corteza de *Prosopis nigra*(Griseb.) Hieron, Mimosaceae, en relación a algunas magnitudes dendrométricas. Revista Forestal Venezolana. 44(2):29-37.
- [80] Villalba, R. (1988). Dendrocronología: su aplicación al manejo dasonómico de los algarrobales. *Prosopis* en la Argentina. Inédito.
- [81] Catalán, L. (2000). Crecimiento leñoso de *Prosopis flexuosa* en una sucesión post-agrícola en el Chaco Árido: efectos y relaciones de distintos factores de proximidad. Tesis doctoral. 230 p.
- [82] Alder, D. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Estudio FAO: Montes. Volumen 2. PP 56-61
- [83] Bornaetxea, Txomin and Antigüedad, I and Ormaetxea, O. (2018), Mapas de susceptibilidad de deslizamientos a partir del modelo de regresión logística en la cuenca del río Oria (Gipuzkoa). Estrategias de tratamiento de variables. Cuaternario y Geomorfología, volume 32, number 1-2, p 7-29.
- [84] Villegas Salli, Villegas Danny, Pérez Yary y Milla Manuel E, 2019, "Modelo de regresión logística para la comparación de series

## REFERENCIAS

---

- climatológicas registradas en la cuenca del río Torbes, Venezuela”, Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable, volume 2. number 3, PP 54-60,
- [85] D Galindez, M Juárez and Giménez, AM and Ríos, N and Balzarini.(2005)., Modelación de crecimiento en *Prosopis alba* Griseb, empleando dos modelos biológicos. Quebracho-Revista de Ciencias Forestales.,Universidad Nacional de Santiago del Estero, number 12, 34-42.
- [86] Soeters, R. y Van Westen, C. (1996). Slope stability recognition analysis and zonation. En: Landslides: Investigation and Mitigation, 129-177. Dai, F. y Lee, C. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3): 213-228.
- [87] Atkinson, P. M. y Massari, R. (1998). Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Computers*.
- [88] Van Den Eeckhaut, M.; Vanwallegem, T.; Poesen, J.; Govers, G.; Verstraeten, G. y Vandekerckhove, L. (2006). Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 76(3): 392-410., Trigila, A.; Iadanza, C.; Esposito, C. y Scarascia- Mugnozza, G. (2015). Comparison of logistic regression and random forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampileri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, 249: 119-136.
- [89] Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and Engineering Practice*, 24: 20-47.
- [90] Felicísimo, A. M.; Cuartero, A.; Remondo, J. y Quirós, E. (2013). Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides*, 10(2): 175-189.
- [91] Carrera, Elena; Vaira, Stella; Abramovich, Beatriz; Walz, Florencia; Contini, Liliana., (2003)., Modelando la detección del riesgo de niveles

## REFERENCIAS

---

- altos de *Cryptosporidium* en fuentes de aguas. Revista FABICI, vol 7, pags. 101-108
- [92] Carrera, E.; Abramovich, B.; Contini, L.; Vaira, S.; Lura, M.C., 2001. Parasitos en agua. Modelos estadísticos de predicción. FABICIB. 5: 77-85
- [93] MacCullag, P.; Nelder, J.A., 1989. "Generalized Linear Models". Chapman and Hall-CRC. 2 Ed. (London). 98-148. Bagley, S.; White, H.t, Golomb, B., 2001. Logistic regression in the medical literature: Standards for use and reporting, with particular attention to one medical domain. *Journal of Clinical Epidemiology*, 54: 979-985
- [94] Zweig, M.; Campbell, G., 1993. Receiver Operating Characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry*. 39, 4: 561-577.
- [95] Pina, Víctor Manuel Gómez and Paulín, Gabriel Legorreta and Quesada, José Fernando Aceves., Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos en el río El Estado, 2019 Puebla-Veracruz, México, *Revista Geográfica*, num 160, pag. 129-147.
- [96] Mora, O.R.S. y Rojas, G.E., "Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad de San Juan de Grijalva, Chiapas", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, UNAM, XIII(1): 55-68, México, 2012.
- [97] Rodríguez, S.R., Mora, I.G. y Murrieta, J.L.H., "Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVIII(2): 223-236, número especial de Geología Urbana, 2006.
- [98] Un modelo de regresión no lineal para las temperaturas de los arroyos semanales. Mohseni, Omid y Stefan, Heinz G y Erickson, Troy R. *Water Resources Research*. vol 34. núm 10. pág 2685-2692. 1998. Wiley Online Library.
- [99] Calidad de las aguas de los ríos mediterráneos del proyecto GUADALMED. Características físico-químicas. Toro, Manuel and Robles, Santiago and Avilés, Juan and Nuño, Carlos and Vivas, Soledad

## REFERENCIAS

---

- and Bonada, Núria and Prat, Narcís and Alba-Tercedor, Javier and Casas, Jesús and Guerrero, Cristina and others. *Limnetica*. vol 21. num 3-4. pag 63-75. 2002.
- [100] Daniel Mojica; Natalia Pino; Carlos Budtamante; Andrés Monzón Pineda. Establecimiento de índices de calidad ambiental de ríos con bases en el comportamiento del oxígeno disuelto y de la temperatura. Aplicación al caso del río Medellín, en el valle de aburrá en Colombia. revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, ISSN 0012-7353, Vol. 80, N°. 181, 2013, págs. 192-200
- [101] PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL REGIONAL, PGAR, 2020-2039, DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO, CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO LA VIEJA. <https://crq.gov.co/wp-content/uploads/2021/03/PGARQUINDIO2020-2039.pdf>
- [102] <https://www.iagua.es/noticias/cambio-climatico/14/03/06/el-agua-caliente-de-los-rios-afecta-la-elevada-sensibilidad-del-artico-al-cam>
- [103] [http://awsassets.panda.org/img/original/glosario-ambiental-1\\_\(1\).png](http://awsassets.panda.org/img/original/glosario-ambiental-1_(1).png)
- [104] <https://es.weatherspark.com/>
- [105] Augusto, César and Toro, Bustamante and Aníbal, Elkin and Durango, Monsalve and León, Pedro and Garcia Reinoso, Pedro, 2007 pag. 205-221, title. Los Caudales Ecológicos: Herramienta Fundamental en la Gestión Integral de las Fuentes Hídricas Del Quindío, volume.17, Revista de Investigaciones Universidad del Quindio.