



**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
UNA TURBINA HIDROELÉCTRICA COMO FUENTE ENERGÉTICA
PARA LA POBLACIÓN DEL CASCO URBANO DE LA INSPECCIÓN
MUNICIPAL DE SAN JOAQUÍN UBICADA EN EL MUNICIPIO DE LA
MESA, CUNDINAMARCA. FASE I**

Daniel Fernando Romero Ronderos

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019



**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA
TURBINA HIDROELÉCTRICA COMO FUENTE ENERGÉTICA PARA LA
POBLACIÓN DEL CASCO URBANO DE LA INSPECCIÓN MUNICIPAL DE SAN
JOAQUÍN UBICADA EN EL MUNICIPIO DE LA MESA – CUNDINAMARCA, FASE I**

Daniel Fernando Romero Ronderos

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director (a):

Alfonso Avellaneda Cusarúa

Línea de Investigación:

Energías alternativas

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019



SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA No: 1026

El día **10 MAYO 2019**, en las instalaciones de la Universidad El Bosque, se desarrolló la sustentación del trabajo de grado titulado **ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA TURBINA HIDROELÉCTRICA COMO FUENTE ENERGÉTICA PARA LA POBLACIÓN DEL CASCO URBANO DE LA INSPECCIÓN MUNICIPAL DE SAN JOAQUÍN UBICADA EN EL MUNICIPIO DE LA MESA, CUNDINAMARCA. FASE I**, escrito por **DANIEL FERNANDO ROMERO RONDEROS, CÉDULA 1022408221**, bajo la dirección de **JOSE ALFONSO AVELLANEDA CUSARIA, CÉDULA 19220589**, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental. El trabajo fue evaluado por los jurados **EDGAR EDUARDO LADINO MORENO CÉDULA 79.662.344** y **MARÍA EUGENIA GUERRERO USEDA CÉDULA 51857112**, quienes deliberaron y concluyeron que cumple con los criterios de calidad.

Por lo tanto, el trabajo es: **Aprobado**.

En constancia, se firma en Bogotá, D.C.


KENNETH OCHOA VARGAS
Director
Programa de Ingeniería Ambiental


GERMÁN AGUDELO ASCENCIO
Secretario Académico
Facultad de Ingeniería

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria

A Dios, quien como guía estuvo presente en el caminar de mi vida, a toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento me permitieron culminar mi carrera profesional y a las personas que me acompañaron durante toda esta etapa, aportando tanto a mi formación profesional como personal.

Agradecimientos

A Dios, por ser mi guía e iluminar mi camino para poder cumplir una de las metas más importantes de mi vida, por ser mi fortaleza en los momentos de tempestad y por permitirme vivir experiencias gratificantes.

A mis padres quienes con su amor, paciencia, esfuerzo y dedicación me han permitido llegar a cumplir un sueño más, por inculcar en mi formación grandes valores, son mi mayor ejemplo de esfuerzo y perseverancia.

A mis hermanos por el acompañamiento desde el primer día que inicie la carrera, por apoyarme en los diferentes aspectos de mi vida y aportar a mi crecimiento personal y profesional.

A los docentes Hommy Copete, Carlos Quintero y Natalia Velázquez por sus aportes, colaboración, acompañamiento, y dirección en las generalidades del proyecto de grado y en las actividades finales de mi etapa de pregrado.

A mi director, José Alfonso Avellaneda Cusaria, por brindarme su conocimiento, interés, acompañamiento y guía en el desarrollo del proyecto de grado.

A mi compañero, Carlos Santiago Rocha Granados por sus aportes y acompañamiento durante el planteamiento y desarrollo de la fase teórico-conceptual del proyecto.

A mi compañera, Paola Andrea Torres Diaz por su apoyo y acompañamiento durante todo este proceso.

A mis compañeros de la EAAB ESP, Esteban Esquivel y Viviana Martínez por sus aportes, flexibilidad y apoyo durante la culminación de mi proyecto de grado.

A todas las personas y entidades que me brindaron sus conocimientos y valiosa información como la Alcaldía municipal de La Mesa, Enel-Codensa, IDEAM y habitantes de la Inspección municipal de San Joaquín, que permitieron el desarrollo exitoso del proyecto y actividades realizadas en campo.

Tabla de Contenido

Resumen.....	12
Palabras clave.....	12
Abstract.....	13
Key words.....	13
1. Introducción.....	14
2. Problema de investigación.....	15
2.1. Pregunta problema.....	15
3. Justificación.....	16
4. Objetivos.....	17
4.1. General.....	17
4.2. Específicos.....	17
5.Marco de referencia biogeográfico.....	18
5.1 Descripción del territorio.....	18
5.2 Descripción ambiental.....	21
5.2.1. Hidrografía.....	21
5.2.2. Climatología.....	22
5.3. Descripción social.....	27
5.4. Descripción económica.....	28
5.5 Marco institucional.....	30
6. Marcos de referencia estado del arte- teórico-conceptual.....	35
6.1. Estado del arte.....	35
6.2. Marco de referencia teórico.....	38
6.3. Marco de referencia conceptual.....	42
7. Marco de referencia legal.....	44
8. Metodología.....	46
9. Plan de trabajo.....	51
10. Resultados, análisis y discusión.....	54
10.1 Objetivo específico N° 1.....	54
10.1.1. Dimensión hidrológica.....	54
10.1.1.1. Topografía y pendientes.....	56
10.1.1.2. Morfometría de la subcuenca Río Apulo.....	59
10.1.1.3. Sistemas de drenaje.....	62
10.1.1.4. Precipitación.....	63
10.1.1.5. Estudio de Caudales.....	67
10.1.1.6. Oferta hídrica de la subcuenca Río Apulo.....	72

10.1.1.7. Demanda hídrica de la subcuenca Río Apulo.....	73
10.1.1.8. Solidos totales, solidos disueltos y solidos suspendidos.	74
10.2. Objetivo específico N°2.	79
10.2.1. Consumo energético de la Inspección municipal - La Mesa, Cundinamarca.....	79
10.2.2. Selección de la turbina a implementar.	80
10.2.3. Capacidad de generación de energía eléctrica de la Turbina Vortex respecto a las condiciones de la Inspección municipal de San Joaquín.....	83
10.3 Objetivo específico N°3.....	84
10.3.1. Matriz de impactos sociales, económicos y ambientales.	84
10.3.2. Dimensión económica.....	85
10.3.2.1. Costos de inversión y retorno de inversión.....	85
10.3.2.2. Mantenimiento de la turbina.....	87
10.3.3. Dimensión social y ambiental.....	87
11. Conclusiones.....	92
12. Recomendaciones.....	93
13.Referencias Bibliográficas.....	94
14.Anexos.....	99
14.1 Cronograma.....	99
14.2Presupuesto.....	100
14.3Soportes de campo.....	101
14.4Soportes prueba de laboratorio.....	105

Listado de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica Colombia-Cundinamarca.....	18
Figura 2. Ubicación geográfica Cundinamarca-Municipio de La Mesa.....	19
Figura 3. Ubicación geográfica Municipio de La Mesa- Inspección Municipal San Joaquín.....	19
Figura 4. Delimitación casco urbano - Inspección Municipal San Joaquín.....	20
Figura 5. Río Apulo a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín.....	20
Figura 6. Cuenca Río Apulo.....	22
Figura 7. Clasificación climatológica de Cundinamarca.....	23
Figura 8. Clasificación climatológica de La Mesa, Cundinamarca.....	23
Figura 9. Leyenda y convenciones de la clasificación climatológica de Cundinamarca.....	24
Figura 10. Clasificación de precipitación total anual del departamento de Cundinamarca.....	25
Figura11. Clasificación de precipitación total anual de La Mesa, Cundinamarca.....	25
Figura 12. Leyenda y convenciones de la clasificación de la precipitación total anual de Cundinamarca.....	26
Figura 13. Clasificación de temperatura media anual del departamento de Cundinamarca.....	26
Figura 14. Clasificación de temperatura media anual de La Mesa, Cundinamarca.....	27
Figura 15. Leyenda y convenciones de la clasificación de la temperatura media anual de Cundinamarca.....	27
Figura 16. Plaza frutícola de la Inspección Municipal de San Joaquín.....	29
Figura17. Calle comercial de la Inspección municipal de San Joaquín.....	29
Figura 18. Plaza de mercado la Inspección municipal San Joaquín.....	30
Figura 19. Marco institucional.....	30
Figura 20. Logo y lema de La Mesa, Cundinamarca.....	31
Figura 21. Logo y lema de la CAR.....	31
Figura 22. Parque- Antigua Estación de Ferrocarril de San Joaquín.....	32
Figura 23. Vías férreas.....	32
Figura 24. Caserío.....	33
Figura 25. Presencia de especies ferales.....	33
Figura 26. Vertimiento directo hacia el Río Apulo.....	34
Figura 27. Estación hidrológica IDEAM en San Joaquín.....	34
Figura 28. Marco teórico conceptual.....	35
Figura 29. Hidroenergía.....	38
Figura 30. Modelo real propuesta por Turbulent Hydro.....	39
Figura31. Modelo Turbina propuesta por Turbulent Hydro.....	40
Figura 32. Modelo de implementación de la turbina propuesta por Turbulent Hydro.....	40
Figura 33. Visión general del sistema de turbina propuesta por Turbulent Hydro.....	41
Figura 34. Equivalencia energía hidroeléctrica.....	42
Figura 35. Enfoque del proyecto de investigación.....	43
Figura 36. Método de investigación.....	49
Figura 37. Límite de la investigación.....	50
Figura 38. Metodología propuesta.....	50
Figura 39. Fase inicial del proyecto de investigación Fase I.....	52
Figura 40. Fase experimental del proyecto de investigación Fase I.....	52
Figura 41. Fase final del proyecto de investigación Fase I.....	53
Figura 42. Localización de la Subcuenca Río Apulo.....	55
Figura 43. Delimitación de los municipios de la subcuenca Río Apulo.....	56
Figura 44. Mapa en relieve de Inspección municipal San Joaquín.....	57
Figura 45. Cuenca Río Apulo.....	59

Figura 46. Clasificación de los cauces según la metodología de Horton.	63
Figura 47. Precipitación periodo 1986-2003 Estación La Mesa.....	64
Figura 48. Precipitación en la Inspección municipal San Joaquín 2018-2019.	66
Figura 49. Cota nivel máximo Río Apulo a su paso por la Inspección municipal San Joaquín...	66
Figura 50. Cota nivel promedio Río Apulo a su paso por la Inspección municipal San Joaquín.	66
Figura 51. Cota nivel mínimo Río Apulo a su paso por la Inspección municipal San Joaquín...	67
Figura 52. Caudales estación San Javier, Río Apulo periodo 1999-2003.	68
Figura 53. Curva de duración de caudales medios, Estación San Javier.	69
Figura 54. Diagrama conceptual para la asignación de un objetivo de manejo para un CE.....	70
Figura 55. Régimen de caudal ecológico para un objetivo de manejo dado a partir del caudal natural medio interanual y las funciones ecológicas que desempeñan sus componentes.....	70
Figura 56. Aplicación del contador OTT Z400 y del micro molinete OTT C2.	71
Figura 57. Perfil de toma de medidas del Río Apulo.	72
Figura 58. Prueba de laboratorio.	74
Figura 59. Bomba de vacío para determinación de SST y SDT.....	75
Figura 60. Muestras de agua en capsulas.	75
Figura 61. Muestras en el desecador.	76
Figura 62. Peso de las muestras en balanza analítica.	76
Figura 63. Turbina Vortex.	81
Figura 64. Esquema de la Turbina Vortex.....	81
Figura 65. Especificaciones de la Turbina Vortex.....	82
Figura 66. Posible ubicación de la MCH.	82
Figura 67. Convertidor Turbulent.....	83
Figura 68. Mantenimiento mínimo de la turbina Vortex.	87
Figura 69. Acuerdo de Paris.	88
Figura 70. Simulación del retorno del agua al cauce natural del cuerpo de agua.....	89
Figura 71. Turbina Vortex amigable con los peces.	89
Figura 72 Beneficios de una MCH.	90
Figura 73. Viabilidad social, económica y ecológica del proyecto.	91
Figura 74. Prototipo de múltiples turbinas Vortex para mayor eficiencia de generación energética.....	93
Figura 75. Puntos de toma de mediciones y cambio de pendiente.	101
Figura 76. Río Apulo a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín.	101
Figura 77. Toma de medidas del Río Apulo a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín.....	102
Figura 78. Toma de datos del Río Apulo a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín.....	102
Figura 79. Visita de campo Inspección municipal de San Joaquín.....	103
Figura 80. Medición del ancho del Río Apulo.	103
Figura 81. Medición de la profundidad del Río Apulo.	104
Figura 82. Medición de caudal del Río Apulo con Molinete OTT C2.	104
Figura 83. Toma de datos del contador OTT Z400.....	105
Figura 84. Prueba de laboratorio, determinación de sólidos en muestra de agua.	105
Figura 85. Prueba de solidos suspendidos y disueltos.	106
Figura 86. Muestras para ingresar a la estufa.	106
Figura 87. Muestras en el desecador.	107
Figura 88. Muestra en balanza analítica.	107

Listado de Tablas

Tabla 1. Inspecciones municipales de La Mesa, Cundinamarca.....	18
Tabla 2. Características físicas de la cuenca del Río Apulo.....	21
Tabla 3. Número de habitantes de la Inspección de San Joaquín.....	28
Tabla 4. Instituciones relacionadas con la inspección municipal San Joaquín.....	31
Tabla 5. Turbinas Instaladas en PCH en Colombia.....	37
Tabla 6. Clasificación de las PCH, según la CREG.....	39
Tabla 7. Normatividad.....	44
Tabla 8. Variables hidrológicas del proyecto de investigación.....	46
Tabla 9. Variables sociales del proyecto de investigación.....	47
Tabla 10. Variables económicas del proyecto de investigación.....	47
Tabla 11. Instrumentos y técnicas.....	51
Tabla 12. Área del Río Apulo distribuida en los diferentes municipios.....	54
Tabla 13. Distribución territorial de los diferentes rangos de pendiente para la subcuenca Río Apulo.	58
Tabla 14. Morfometría de la subcuenca Apulo.	62
Tabla 15. Convenciones clasificación de los cauces según metodología Horton.	63
Tabla 16. Valores totales mensuales de precipitación, estación CAR en La Mesa, Cundinamarca, periodo 1986-2003... ..	64
Tabla 17. Datos estación limnimétrica San Joaquín.....	65
Tabla 18. Área tributaria Río Apulo.....	67
Tabla 19. Valores medios mensuales de caudales Río Apulo.	68
Tabla 20. Caudales mínimos generados Río Apulo.....	68
Tabla 21. Caudales máximos generados Río Apulo.....	68
Tabla 22. Valores característicos caudales medios, estación San Javier -La Mesa Cundinamarca.....	69
Tabla 23. Caudal ecológico Río Apulo.....	71
Tabla 24. Mediciones en campo Río Apulo.....	72
Tabla 25. Oferta hídrica Río Apulo.....	73
Tabla 26. Demanda hídrica Río Apulo.....	73
Tabla 27. Demanda doméstica Río Apulo.....	73
Tabla 28. Demanda agrícola Río Apulo.....	74
Tabla 29. Demanda industrial Río Apulo.....	74
Tabla 30. Cantidad de cuentas 2017 Enel-Codensa.....	79
Tabla 31. Consumo de energía kWh 2017 Enel- Codensa.	79
Tabla 32. Cantidad de cuentas 2018 Enel- Codensa.	79
Tabla 33. Consumo de energía kWh 2018 Enel- Codensa.....	80
Tabla 34. Modelos de turbinas propuesto por Turbulent.	80
Tabla 35. Matriz de impactos en las dimensiones social, biótica y abiótica.	84
Tabla 36. Convenciones matriz de impactos en las dimensiones social, biótica y abiótica.....	85
Tabla 37. Tarifas de energía eléctrica Sector residencial.	85
Tabla 38. Tarifas de energía eléctrica Sector no residencial.	85
Tabla 39. Tiempo de recuperación del costo de inversión.	86
Tabla 40. Cronograma de actividades Proyecto de investigación Fase I.....	99
Tabla 41. Convenciones Cronograma de actividades Proyecto de investigación Fase I.....	99
Tabla 42. Presupuesto.....	100

Listado de Ecuaciones

Ecuación 1. Potencial hidráulico.....	41
Ecuación 2. Densidad de drenajes.....	60
Ecuación 3. Altura media de la cuenca.....	60
Ecuación 4. Ancho medio de la cuenca.....	60
Ecuación 5. Índice de Gravelius.....	61
Ecuación 6. Índice de Torrencialidad.....	61
Ecuación 7. Tiempo de concentración.....	61
Ecuación 8. Solidos totales.	79
Ecuación 9. Solidos suspendidos totales.	79
Ecuación 10. Solidos disueltos totales.	80
Ecuación 11. Energía potencial.....	80

Resumen

El presente trabajo se desarrolló partiendo del estado del recurso eléctrico, el cual resulta deficiente para la Inspección municipal de San Joaquín, ubicado en La Mesa, Cundinamarca, por ende, como objetivo principal se tiene el estudio de la prefactibilidad de la implementación de una turbina hidroeléctrica como generador de energía, la cual pueda satisfacer un porcentaje óptimo del déficit existente.

Para lo anterior se planteó el uso de una energía limpia y renovable, con el fin de conducir a la Inspección municipal a un escenario de aprovechamiento del potencial hidroeléctrico de la zona, con un menor impacto y mayor beneficio social, económico y ambiental.

Inicialmente se realizó un diagnóstico de la hidrografía y su potencial energético de la zona objeto de estudio, el cual se basó en revisión bibliográfica para lograr tener un recuento de los cuerpos de agua cercanos o aportantes a la cuenca del Río Apulo. Posteriormente, teniendo en cuenta el consumo energético de la población de la Inspección municipal y el rendimiento de la turbina seleccionada, se determinó la cantidad de energía eléctrica que puede proporcionar este sistema dependiendo principalmente del caudal y la pendiente del terreno.

Si bien es cierto, no se pudo extraer el 100% de la energía de la corriente del Río Apulo, se aprovechó la mayor cantidad posible, gracias al diseño óptimo de la turbina.

El trabajo brindó una alternativa para el aprovechamiento de un recurso energético fundamental en el país, pero poco implementado a pequeña escala y en zonas con baja calidad de vida como lo es la energía hidroeléctrica y permitió conocer la viabilidad de este tipo de energía a nivel social, económico y ecológico con tecnologías limpias.

Palabras clave: Déficit, diagnostico, energía limpia, aprovechamiento, potencial, hidroeléctrica.

Abstract

This work is based on the state of the electrical resource, which is deficient in the municipal inspection of San Joaquin, located in La Mesa, Cundinamarca, for example, as the main objective is the study of the pre-feasibility of the incidence of a hydroelectric turbine as an energy generator, which can satisfy an optimal percentage of existing deficit.

For the above, the use of clean and renewable energy is used, in order to lead to municipal inspection and the potential to take advantage of the hydroelectric potential of the area, with a lower impact and greater social, economic and environmental benefit.

Initially, a diagnosis of hydrography and its energetic potential was made in the area under study, based on the bibliographic review to obtain a report of the water bodies or contributors to the Apulo river basin. Afterward, taking into account the energy consumption of the population of the municipal inspection and the performance of the selected turbine, the amount of electrical energy that this system can provide be determined.

Although it is true, it will not be possible to extract 100% of the energy from the Apulo River current, it was take advantage of as much as possible, thanks to the optimal design of the turbine.

The work became an alternative for the use of a fundamental resource in the country but little implemented on a small scale and in the areas with the quality of life such as hydroelectric energy and knowledge of the viability of this type of energy at the social, economic and ecological level with clean technologies.

Keywords: Deficit, diagnosis, clean energy, exploitation, potential, hydroelectric.

1. Introducción

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, inicialmente se planteó un problema de investigación, el cual tiene como línea base documentos como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París que tienen como objetivo reducir los gases de efecto invernadero y por ende el cambio climático, mediante la implementación de energías alternativas o no convencionales, que permitan disminuir el uso de las energías a base de carbono como el petróleo, gas y carbón.

Aunque, actualmente se han ido desarrollando energías alternativas como: solar, eólica, mareomotriz, entre otras, la cuales se caracterizan por generar impactos ambientales mínimos, sin embargo, estas energías presentan mu baja implementación, teniendo la capacidad de ser desarrolladas con amplios beneficios para las sociedades y aún más para aquellas que carecen de este recurso.

Según Richard Feynman (1988) *“Toda materia es energía en reposo, y la energía se manifiesta en multitud de formas que se relacionan entre sí mediante numerosos mecanismos de conversión”*, como lo es en este caso la energía hidroeléctrica la cual se genera a partir de la velocidad del flujo del recurso hídrico en un cuerpo de agua, con el fin de satisfacer las necesidades energéticas que en este caso se presentan en la población objeto de estudio.

En un país como Colombia, el recurso hídrico es abundante, por esto se puede plantear, obtener energía a partir del movimiento de las aguas superficiales que se encuentran tanto en ríos como quebradas, dejando de lado las formas tradicionales como grandes represas que de una manera u otra causan un impacto ambiental considerable.

Es aquí donde surge la idea principal del presente estudio, la cual se dirige a buscar nuevas alternativas de generación de energía a partir del recurso hídrico sin causar daños ambientales, aportando tanto beneficios sociales como económicos y con una viabilidad alta en términos temporales.

2. Problema de investigación

Actualmente, ha sido considerado que el aumento de emisiones atmosféricas por parte de los sectores industriales, agrícolas, forestales, comercial y domésticas, ha incrementado el cambio climático por el uso de las energías asociadas a la generación de gases de efecto invernadero tales como las que utilizan combustibles fósiles o las grandes represas por su generación de metano. Este estudio de investigación está ubicado en los sectores domésticos y comerciales del casco urbano de la Inspección municipal San Joaquín, Cundinamarca.

Para el caso de estudio específico en la Inspección municipal (San Joaquín) se puede evidenciar una necesidad expresada por la misma Alcaldía de la Mesa acerca de falencias energéticas. El POT del municipio ha identificado la siguiente problemática relacionada con el suministro oportuno y suficiente de energía por parte de la Empresa de energía de Cundinamarca y Condensa E.S.P.

“Debido al escaso mantenimiento de postes, redes, transformadores y líneas de conducción, se originan continuos apagones que perjudican principalmente a la comunidad y al sector comercial, ocasionando pérdidas económicas, luego entonces es necesario optimizar las redes eléctricas urbanas con un programa a corto plazo de remodelación de las redes de media tensión (29 Km) y baja tensión (55 Km).

Se hace necesario buscar una alternativa en la prestación de este servicio, por otras entidades prestadoras como ISA, CODENSA S.A. u otras entidades. En cuanto al alumbrado público se plantea la prestación de este servicio por una empresa privada, con la figura de concesión.

En la parte rural, siendo su cobertura de un 85%, se debe implementar un programa de la ampliación de las redes, para obtener una mayor cobertura.” (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)

Los inconvenientes anteriores, además de implicar deficiencias en la prestación del servicio de energía para la población repercuten en altos costos de este servicio debido a su transporte y distribución.

La ley 1715 de 2014 la cual regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. (Ministerio de Minas y Energía, 2014) ofrece la oportunidad que los entes municipales o empresas locales generen energía a partir de recursos como el agua, el viento o el sol.

Con esta investigación se ve la posibilidad de generar energía a partir del movimiento del caudal del Río Apulo en cantidades que puedan contribuir a mejorar un suministro sostenible y económico para la población local.

2.1 Pregunta problema

¿Qué viabilidad hay de implementar un sistema generador de energía a partir de una turbina hidroeléctrica en el Río Apulo a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín ubicada en el municipio de la Mesa, Cundinamarca?

3. Justificación

San Joaquín es una Inspección municipal perteneciente al municipio de la Mesa Cundinamarca, Colombia, ¿Por qué este lugar?, se puede inferir fácilmente que éste presenta fallas energéticas de algún tipo. Sin embargo, es importante aclarar que el inconveniente que posee dicha Inspección con la energía eléctrica es un déficit en la zona. A partir de esto, surge la idea del presente proyecto, y es de vital importancia tener en cuenta que la zona cuenta con una hidrografía (ríos y quebradas) suficiente como para brindar un aporte energético el cual suplir el déficit que se presenta en el área objeto de estudio.

La presente investigación busca proponer una forma de obtener energía la cual se resalta por ser una energía limpia o renovable, que logre cubrir el déficit energético presente en el casco urbano de la inspección. Desde la ingeniería ambiental se busca impulsar la importancia de las energías alternativas, en este caso la hidroenergía a pequeña escala, logrando abarcar las diferentes dimensiones, las cuales son social, ecológico y económico.

El proyecto busca mejorar la calidad de vida de la población de la Inspección municipal, brindando energía eléctrica permanente la cual provenga de una fuente limpia, en este caso energía hidroeléctrica contando como la fuente el Río Apulo. Esto permitirá desarrollar actividades comerciales y domésticas sin problema alguno disminuyendo la afectación económica que se pudiera presentar. Es importante resaltar las diferentes dimensiones que abarcan el proyecto de investigación, como lo son:

Social: Brindar por medio del recurso hídrico energía al casco urbano de la Inspección municipal San Joaquín debido al déficit eléctrico que posee y afecta a la población que allí se encuentra.

Económico: Producir un ahorro mediante el desarrollo de las energías no convencionales en el municipio, obteniendo un valor agregado en cuanto a los niveles de competitividad y productividad del sector energético.

Ecológico: Implementar energías limpias y amigables con el medio ambiente, como mecanismo de conservación de los abundantes recursos naturales que se encuentran en la Inspección municipal.

Académicos: Fortalecer los conocimientos obtenidos y enfocados en energías alternativas siendo un profesional integral, entrelazando aspectos sociales, económicos y ecológicos.

Políticos: Resaltar la importancia de la implementación de las energías renovables en los proyectos presentados, regidos por el POT del municipio La Mesa, Cundinamarca.

Institucionales: Generar aportes relevantes para el tema base de la investigación, el cual sea fuente de consulta para futuros trabajos relacionados con energías alternativas, especialmente con la hidroenergía.

Los resultados de la presente investigación en su Fase I serán la base para determinar el modelo de turbina indicada para que trabaje bajo las condiciones y parámetros existentes del cuerpo de agua, determinados después de un proceso investigativo y de trabajo en campo. La prefactibilidad de dicha turbina con respecto a la necesidad energética de la población objeto de estudio beneficiara directamente a los habitantes de la Inspección de San Joaquín.

4. Objetivos

4.1 General

Realizar un estudio de la prefactibilidad en su Fase I para la implementación de una turbina hidroeléctrica como fuente energética económica y ambientalmente sustentable para la población del casco urbano de la Inspección municipal de San Joaquín ubicada en el municipio de la Mesa, Cundinamarca.

4.2 Específicos

- Estudiar la hidrografía aledaña a la Inspección municipal de San Joaquín y sus potencialidades energéticas.
- Identificar la cantidad de energía que potencialmente puede proporcionar una turbina hidroeléctrica, en relación a la satisfacción de las necesidades de la Inspección municipal de San Joaquín.
- Evaluar la viabilidad económica, social y ecológica para la implementación de un modelo de turbina hidroeléctrica como generador energético.

5. Marco de referencia biogeográfico

Las condiciones biogeográficas son de vital importancia para el ejercicio investigativo ya que son la base fundamental en cuanto a los conocimientos previos que se deben tener en cuenta como la ubicación en donde se va a realizar el proyecto, la descripción de la zona objeto de estudio, entre otros.

5.1. Descripción del territorio

San Joaquín es una de las tres inspecciones municipales de La Mesa, Cundinamarca como se observa en la Tabla 1, el cual se encuentra ubicado al oeste del casco urbano a 11 km por carretera, el clima que se presenta es cálido y la distancia es de tan solo hora y media de Bogotá D.C.

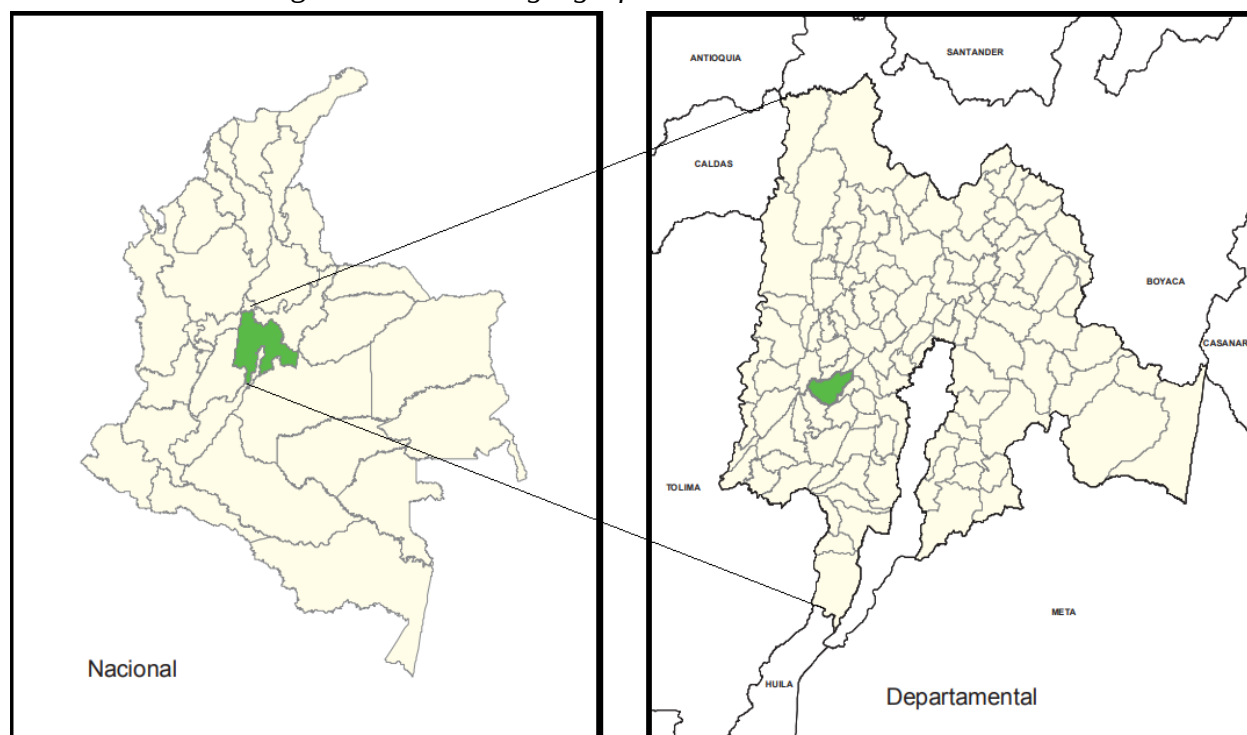
Tabla 1. *Inspecciones municipales de La Mesa, Cundinamarca*

Inspección Municipal	Área (h)
San Joaquín	25,26
San Javier	26,21
La Esperanza	8,89

Fuente: (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)

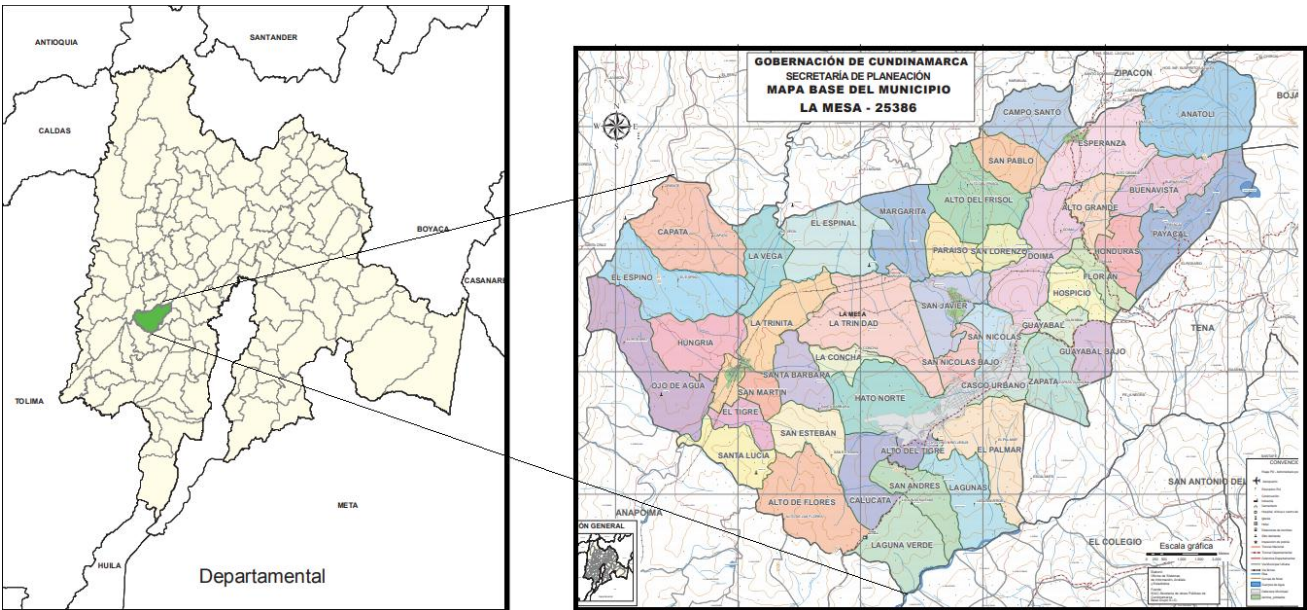
A continuación, se presentan los mapas de ubicación de la Inspección objeto de estudio, presentados en las Figuras 1, 2,3 y 4.

Figura 1. *Ubicación geográfica Colombia-Cundinamarca*



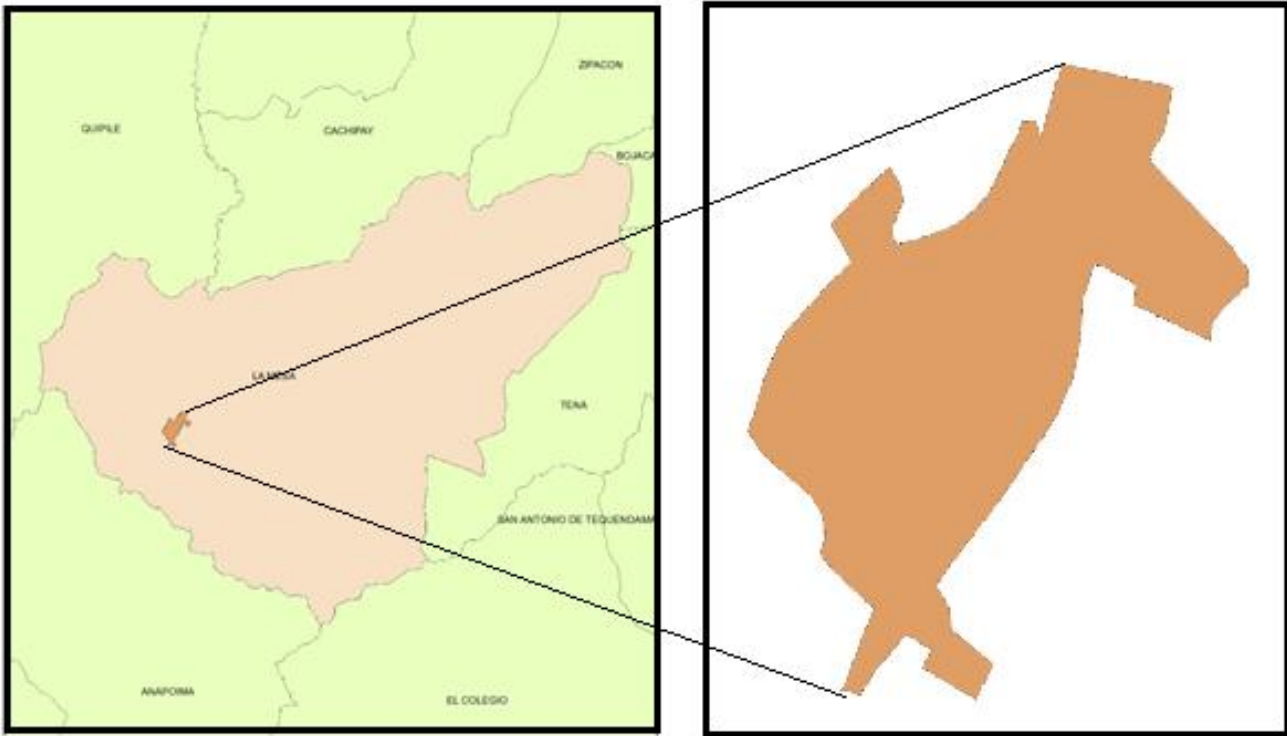
Fuente: (Secretaría de planeación, 2017)

Figura 2. Ubicación geográfica Cundinamarca-Municipio de La Mesa



Fuente: (Secretaria de planeación, 2017)

Figura 3. Ubicación geográfica Municipio de La Mesa- Inspección Municipal San Joaquín



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Delimitación casco urbano - Inspección Municipal San Joaquín.



Fuente: *Elaboración propia*

San Joaquín se conforma aproximadamente por 360 predios en el perímetro urbano en el que habitan más de 1.500 personas. Dicho perímetro se ubica en la ladera occidental de la meseta sobre la cual se asienta el área urbana del municipio de La Mesa, en el valle del Río Apulo el cual se puede observar en la figura 5. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)

Figura 5. Río Apulo a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín.



Fuente: *Elaboración propia*

Adicionalmente, cuenta con 11 veredas con más de 1.000 predios rurales. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000) Para llegar allí, a partir de la Mesa es necesario tomar una carretera surcada por fincas, casas de campo y condominios que contrastan con el verde profundo de la montaña y su vegetación.

5.2 Descripción ambiental

5.2.1 Hidrografía

En el municipio de La Mesa, Cundinamarca, se presentan dos corrientes de primer orden, las cuales son el Río Curí y el Río Bahamón, una corriente de segundo orden siendo el Río Apulo y por último una corriente de tercer orden que es el Río Bogotá.

El Río Apulo nace en el Cerro Manjui ubicado en el municipio de Facatativa a 3.000 m.s.n.m. y recorre los municipios de Anolaina, Zipacon, Bojaca, Cachipay, Tena, La Mesa, Anolaima y Apulo. (Apulo, 2000) como se puede observar en la Figura 6.

Este cuerpo de agua es confirmado por el Río Curí y el Río Bahamón y a lo largo de su cauce derivan quebradas como Doima, Dulce, San Juanito, San Javier, la Carbonera y el Tigre, por la margen izquierda, aguas abajo del río. Hacia la margen derecha tenemos quebradas como la San Pablo, El Arzobispo, Salada, Cachufera, Chimbala, Peladeros, Chambatá, entre otras. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)

El río desemboca sobre la margen derecha del Río Bogotá, inmediatamente aguas abajo del casco urbano de Apulo, con un caudal medio anual de $7 \text{ m}^3/\text{sg}$, y en épocas de verano de $1 \text{ m}^3/\text{sg}$. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)

El río tiene una longitud de 45 Km, de los cuales los primeros 25 transcurren en zona montañosa, con pendiente del orden del 10%, y en tramo final hasta la desembocadura, una pendiente entre el 3 y el 1%, información la cual se encuentra recopilada en la Tabla 2. (Apulo, 2000)

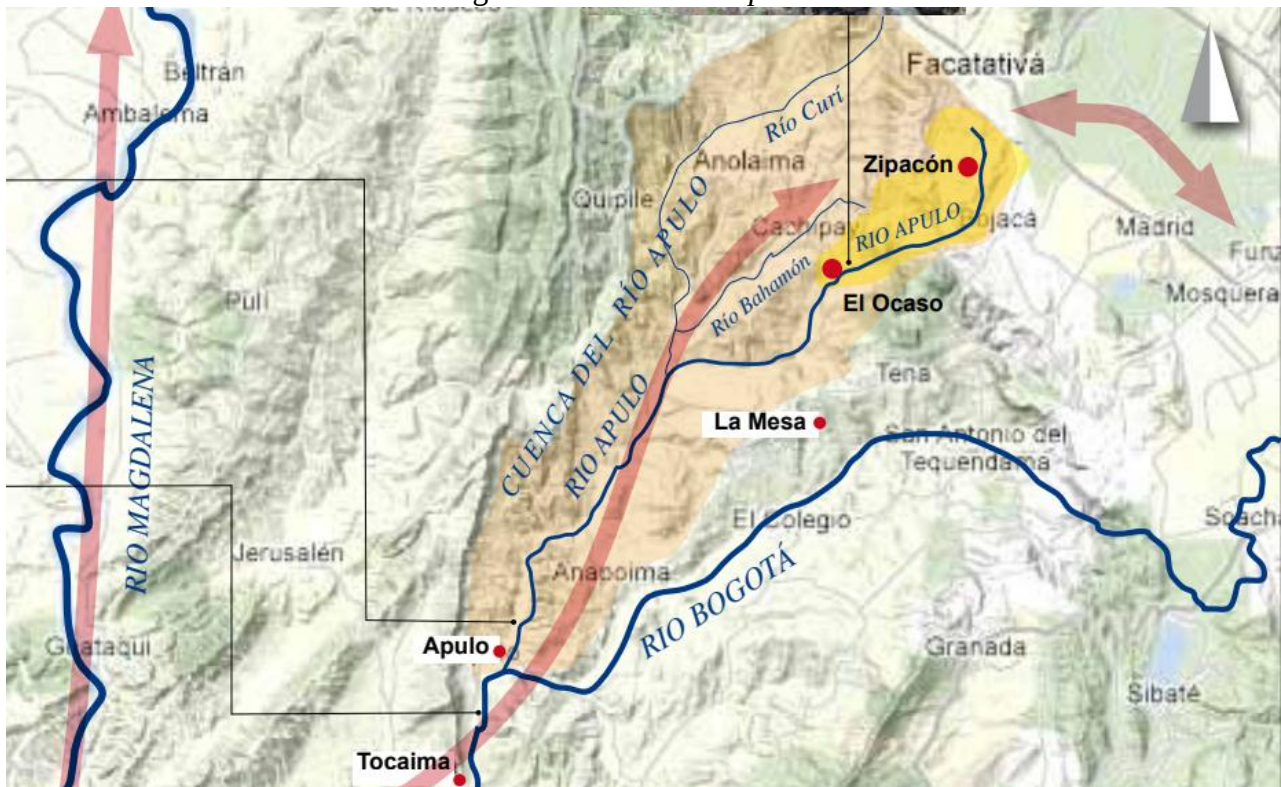
Las características físicas de la cuenca vertiente del Río Apulo son:

Tabla. 2. Características físicas de la cuenca del Río Apulo.

Área	480 Km^2
Longitud del río principal	45 Km
Pendiente media	0.060
Cota de nacimiento del río	3000 m.s.n.m

Fuente: (Apulo, 2000)

Figura 6. Cuenca Río Apulo.



Fuente: (Celis, Rivas, & Durana, 2011)

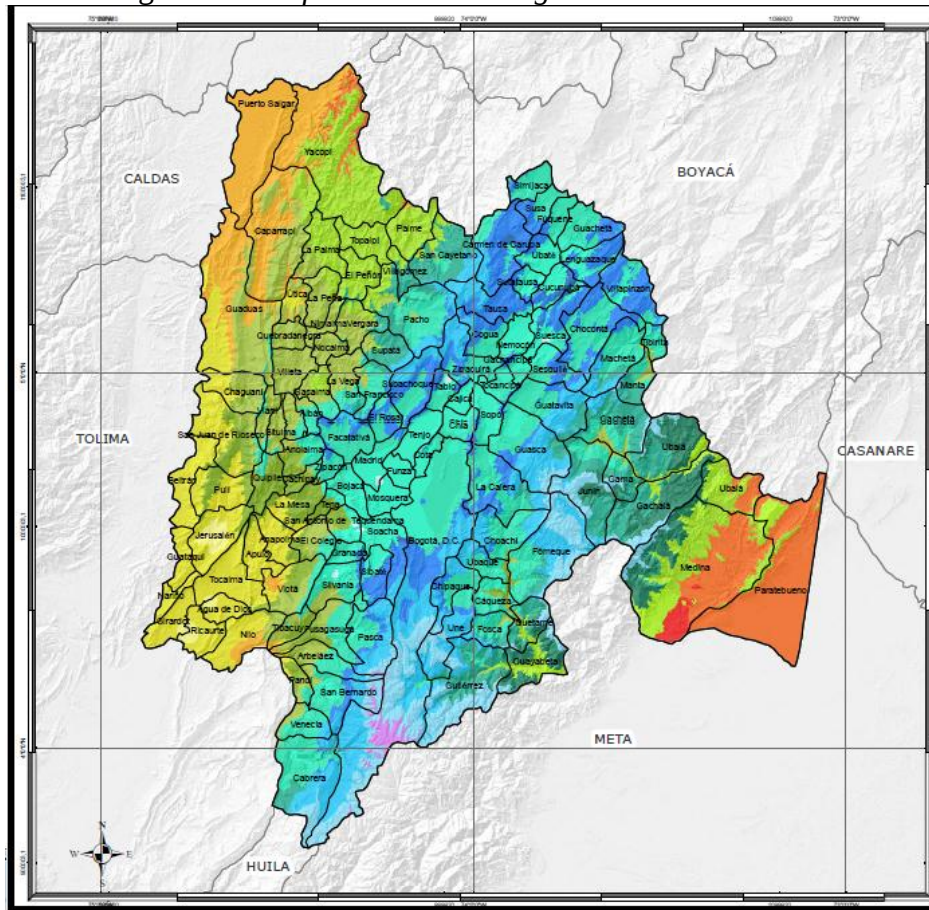
5.2.2 Climatología

La Inspección municipal de San Joaquín, La Mesa se encuentra ubicada en el departamento de Cundinamarca, en las coordenadas geográficas 4°38'12.5"N 74°31'14.5"W, este departamento presenta ciertas caracterizas climatológicas, de precipitación y temperatura propias de la región. A continuación, se podrán detallar características climatológicas del municipio como la calificación climática, la precipitación y temperatura.

- **Clasificación Climática:** La mayor parte de la zona central, correspondiente a la Sabana de Bogotá, es de clima frío semiárido. En cuanto a los sitios localizados a mayor altura pertenecen a climas muy fríos húmedos y semihúmedos. Por otra parte, al occidente, el clima es de tipo cálido árido al sur y de tipo cálido húmedo al norte y al extremo oriental, el clima es cálido húmedo. (IDEAM, 2010)

La clasificación climatológica del departamento de Cundinamarca se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Clasificación climatológica de Cundinamarca.



Fuente: (IDEAM, 2010)

En cuanto al municipio de La Mesa, presenta climas cálidos semiáridos, templados semiáridos y frío semihúmedo como se puede observar en la Figura 8, según la leyenda y convenciones del respectivo mapa presentadas en la Figura 9.

Figura 8. Clasificación climatológica de La Mesa, Cundinamarca.



Fuente: (IDEAM, 2010)

Figura 9. *Leyenda y convenciones de la clasificación climatológica de Cundinamarca.*



Fuente: (IDEAM, 2010)

- **Precipitación:** El departamento presenta un patrón muy variado en cuanto a volúmenes de lluvia se refiere. El núcleo de menores lluvias ocupa la franja central, correspondiente a la Sabana de Bogotá, con cantidades anuales menores a los 1000 mm.

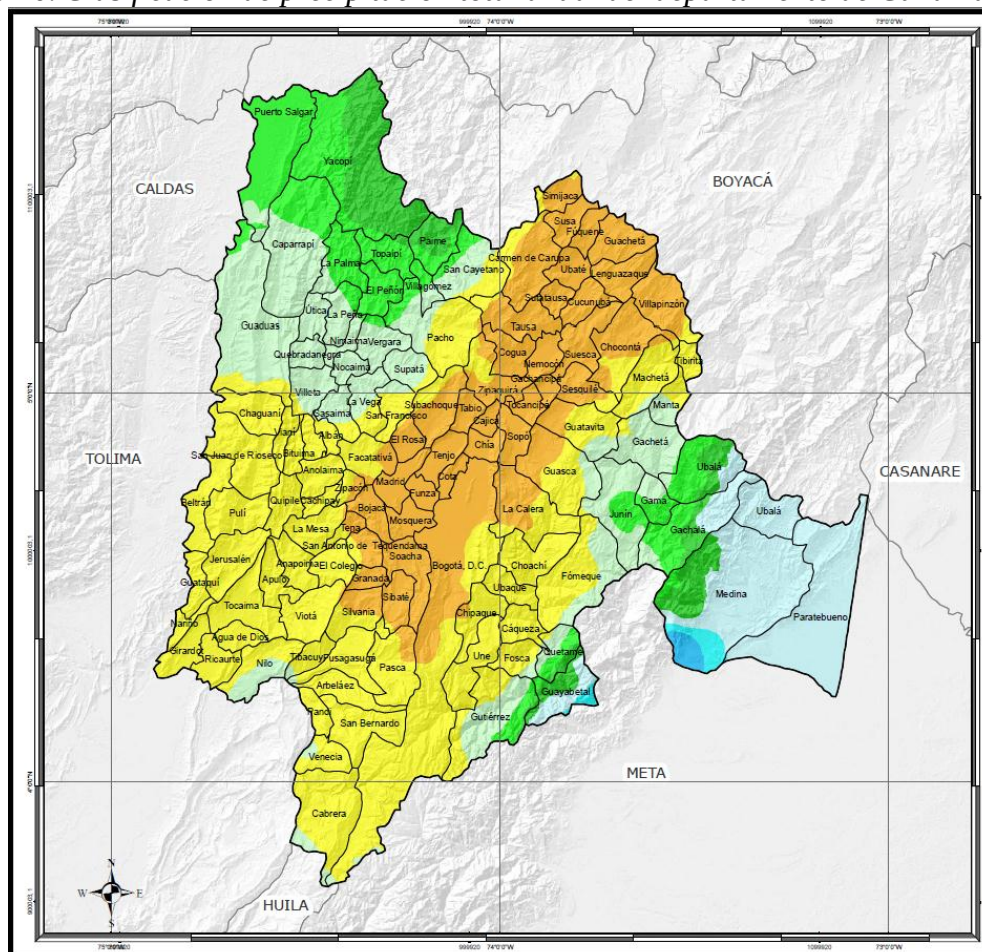
Las lluvias se incrementan hacia el oriente y occidente en dirección a las vertientes de la cordillera oriental. En la vertiente oriental las lluvias alcanzan los mayores valores del departamento con valores cercanos a los 4000 mm en los municipios de Ubalá, Medina y Paratebueno. Hacia la vertiente occidental se registran alrededor de 3000 mm en Yacopí y Paime. (IDEAM, 2010)

El régimen de lluvias en la franja central es de tipo bimodal con dos temporadas secas en diciembre-marzo y junio-agosto. Al oriente, en los municipios localizados sobre la vertiente del Orinoco, el régimen es de tipo monomodal con una temporada seca de diciembre a marzo y máximos de lluvia en los meses de junio y julio. (IDEAM, 2010)

Se detecta una leve disminución al final del mes de agosto. El número de días con lluvia oscila entre 100 y 150 sobre la Sabana de Bogotá. Al oriente se llega a más de 200 días en las laderas de la cordillera Oriental. Al occidente, los valores descienden a menos de 100 días en lugares como Nariño y Beltrán. (IDEAM, 2010)

La clasificación de precipitación del departamento de Cundinamarca se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Clasificación de precipitación total anual del departamento de Cundinamarca



Fuente: (IDEAM, 2010)

En cuanto al municipio de La Mesa, presenta una precipitación total anual de 500 - 1.500 mm como se puede observar en la Figura 11, según la leyenda y convenciones del respectivo mapa presentadas en la Figura 12.

Figura 11. Clasificación de precipitación total anual de La Mesa, Cundinamarca.



Fuente: (IDEAM, 2010)

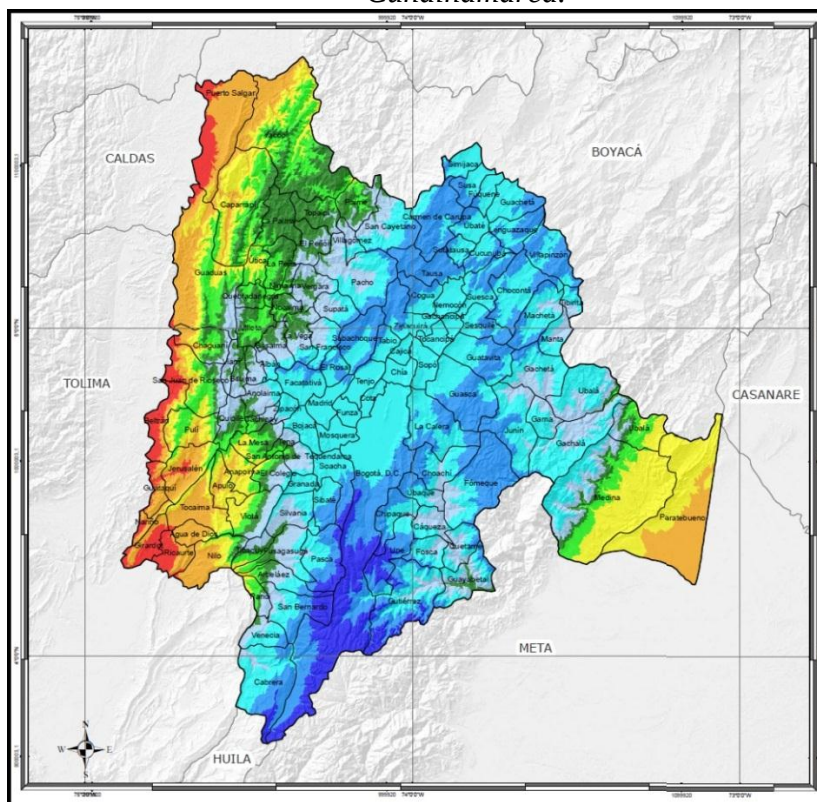
Figura 12. *Leyenda y convenciones de la clasificación de la precipitación total anual de Cundinamarca.*



Fuente: (IDEAM, 2010)

- **Temperatura:** La mayor parte del Departamento pertenece a los pisos térmicos fríos y muy fríos. Al oriente las temperaturas aumentan hasta cerca de 26°C en Paratebueno, mientras que, al occidente, se registran temperaturas medias de alrededor de 28°C en sectores localizados sobre las riberas del Magdalena como se puede observar en la Figura 13. (IDEAM, 2010)

Figura 13. *Clasificación de temperatura media anual del departamento de Cundinamarca.*



Fuente: (IDEAM, 2010)

En cuanto al municipio de La Mesa, presenta una temperatura media anual de 16°C – 26°C como se puede observar en la Figura 14, según la leyenda y convenciones del respectivo mapa presentadas en la Figura15.

Figura 14. *Clasificación de temperatura media anual de La Mesa, Cundinamarca.*



Fuente: (IDEAM, 2010)

Figura 15. *Leyenda y convenciones de la clasificación de la temperatura media anual de Cundinamarca.*



Fuente: (IDEAM, 2010)

5.3 Descripción social

En lo referente a la población, los datos del Plan Básico de Ordenamiento Territorial, PBOT, indican que la Tasa de Crecimiento es de 4.2% para el periodo de 1997-2017, dadas las características de crecimiento poblacional del municipio. Ahora bien, según datos del Sistema de Selección de Beneficiarios SISBEN, se tiene un resultado para el año de 2001 de 26.194 habitantes de los cuales 4.461 (Concejo municipal de La Mesa, 2001) pertenecen a la Inspección municipal de San Joaquín distribuidos como se muestra en la Tabla 3, con un total de aproximadamente 360 pedios en el casco urbano de la inspección. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)

Tabla 3. *Número de habitantes de la Inspección de San Joaquín.*

INSPECCIÓN SAN JOAQUÍN	
VEREDA	Nº DE HABITANTES
CAPATA	397
EL ESPINO	275
HUNGRÍA	238
LA CONCHA	413
OJO DE AGUA	855
SANTA LUCIA	461
SAN MARTÍN	120
LA TRINIDAD	164
LA VEGA	254
ÁREA RURAL	3.177
ÁREA URBANA	1.284
SUB-TOTAL	4.461

Fuente:(Concejo municipal de La Mesa, 2001)

La población de San Joaquín presenta los siguientes consolidados, según datos del SISBEN de un total de 347 viviendas:

- 95% cuenta con servicio de acueducto, un 2% se aprovisiona de una quebrada o un manantial, un 1% se abastece de un pozo con bomba, un 1% se abastece de carro tanque y un 1% de otras fuentes. (Concejo municipal de La Mesa, 2001)
- 24% (83) no tiene servicio sanitario, el 3% (10) poseen letrina, el 17% (59) poseen inodoro sin conexión, el 3% (12) posee inodoro conectado a un pozo séptico y el 53% (183) poseen sistema de alcantarillado. (Concejo municipal de La Mesa, 2001)
- 46% (161) posee servicio de recolección y un 53% (185) la botan en los cauces y quebradas, quedando solamente el 1%, que la disponen en un contenedor o basurero público. (Concejo municipal de La Mesa, 2001)
- Existe una plaza de ferias que está conformada por cuatro corrales, los cuales carecen de un desembarcadero. Además, se cuenta con una plaza de toros con una capacidad para 1200 personas. (Concejo municipal de La Mesa, 2001)

5.4 Descripción económica

La base económica del municipio es agropecuaria, con énfasis en la producción frutícola y en economía cafetera, siendo sus principales productos los cítricos, mango, banano, maracuyá, tomate, café, maíz y caña panelera, que se cultivan en 8.914 predios rurales, ocupando un total de 14.500,7 hectáreas, con un valor catastral de 107.260 millones de pesos, (Concejo municipal de La Mesa, 2008)

Figura 16. *Plaza frutícola de la Inspección Municipal de San Joaquín.*



Fuente: (Cruz, 2011)

Se debe destacar la condición de la Inspección municipal de San Joaquín, por su importante papel en la comercialización de frutas a nivel regional y supra departamental, ya que su mercado recoge ofertas y demandas tanto de la provincia del Tequendama, como de algunas áreas de otras provincias y departamentos cercanos, es especial de municipios del Tolima y a la central de Abastos de la capital del país. (Concejo municipal de La Mesa, 2008)

Figura 17. *Calle comercial de la Inspección municipal de San Joaquín.*



Fuente: (Cruz, 2011)

San Joaquín cuenta con dos espacios para la comercialización de productos agrícolas: uno se ubica en la zona central del corregimiento, al frente de la iglesia y el parque, y está dedicado a la venta de litchigo y productos de tierra fría (como verduras, tubérculos, cebolla, entre otros) que se comercializan en San Joaquín para los habitantes o para comerciantes de lugares aledaños el cual se puede observar en la Figura 18.

El otro corresponde a la Plaza de mercado de frutas la cual se presenta en la Figura 16, que está al lado de la Plaza de toros. Está conformada por kioscos en los cuales hay un espacio para la exhibición de los productos. Los campesinos dejan los guacales en el suelo, mientras que comerciantes de Bogotá y Medellín, principalmente, vienen a negociar la fruta. (Cruz, 2011). En las demás calles de la inspección se pueden encontrar locales comerciales, droguerías, centros de entretenimiento, fruterías, entre otros, como se puede observar en la Figura 17.

Figuras 18. Plaza de mercado la Inspección municipal San Joaquín.

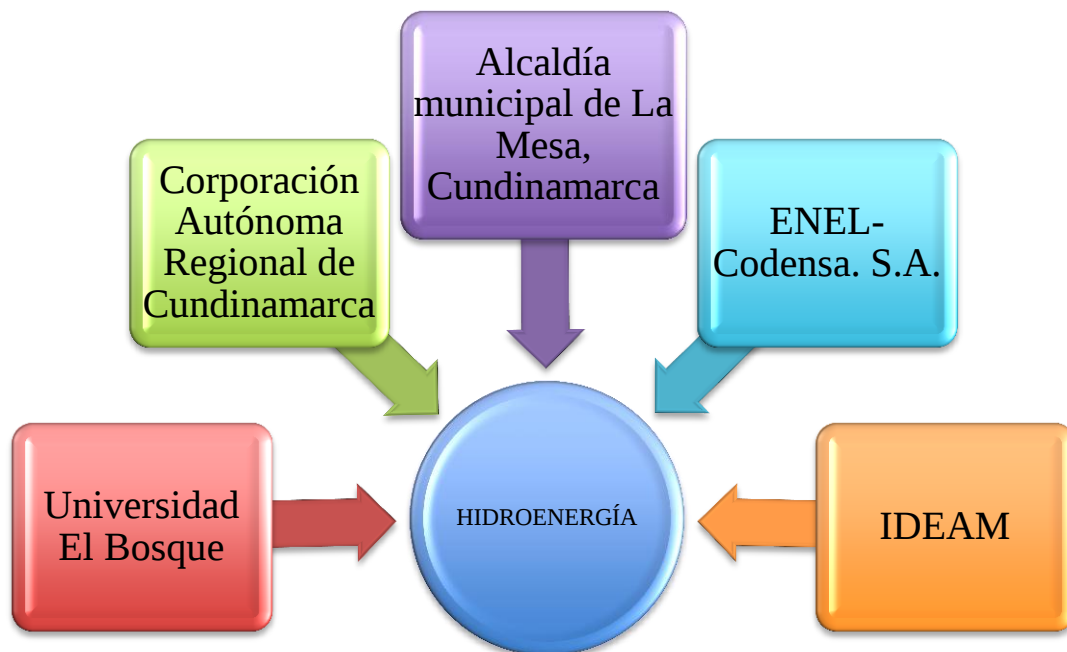


Fuente: (Cruz, 2011)

5.5 Marco institucional

Respecto a las instituciones que se encuentran relacionadas con el desarrollo del proyecto de investigación, se pueden observar en la Figura 19.

Figura 19. Marco institucional.



Fuente: *Elaboración propia*

Algunas entidades gubernamentales las cuales se encuentran en la Figura 20 cumplen funciones como:

- **Alcaldía de La Mesa:** Ajusta y adopta el manual de funciones, requisitos y competencias específicas para los niveles jerárquicos y empleos que conforman la planta de personal de la administración municipal de La Mesa, Cundinamarca la cual cuenta con un logo el cual se puede observar en la Figura 20. (MESA, 2014)

Figura 20. Logo y lema de La Mesa, Cundinamarca



Fuente: (MESA, 2014)

- **CAR:** Esta entidad Figura 21, al igual que las demás corporaciones tienen por objeto la ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos sobre medio ambiente y recursos naturales renovables, así como el cumplimiento y oportuna aplicación a las disposiciones legales vigentes sobre su disposición, administración, manejo y aprovechamiento, conforme a las regulaciones, pautas y directrices expedidas por el Ministerio del Medio Ambiente. (Corporación Regional de Cundinamarca, 2018).

Figura 21. Logo y lema de la CAR.



Fuente: (Corporación Regional de Cundinamarca, 2018).

Otras instituciones que son importantes mencionar por su presencia en la Inspección municipal se especifican en la Tabla 4.

Tabla 4. Instituciones relacionadas con la Inspección municipal San Joaquín.

Instituciones	Número de funcionarios
Secretaria de salud	3
Secretaria de gobierno	8
Secretaria de hacienda	4
Secretaria de obras públicas	23
Secretaria de servicios públicos domiciliarios	28
Fondo de maquinaria	7
Oficina de planeación	4
Oficina asesora o de control interno	2
Oficina de medio ambiente	2

Fuente: (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)

San Joaquín es un lugar tranquilo y acogedor, en los diferentes escenarios que se pueden recorrer se observa su cultura y se percibe historia a lo largo de sus calles, una de las edificaciones resaltadas por su valor histórico y cultural, es la antigua Estación de Ferrocarril ubicada en el centro de esta Inspección municipal, observada en la Figura 22, la cual extiende sus vías férreas atravesando la Inspección como se muestra en la Figura 23.

Figura 22. *Parque- Antigua Estación de Ferrocarril de San Joaquín.*



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 23. *Vías férreas.*



Fuente: *Elaboración propia*

De camino para descender hacia el Río Apulo a los puntos escogidos para la toma de medidas y muestras del cuerpo hídrico, guiados por la antigua carrilera del ferrocarril como se observa en la Figura 24, se atraviesa un caserío evidenciado en la Figura 24 donde se logran observar bajas condiciones de calidad de vida, especies ferales presentadas en la Figura 25.

Figuras 24. *Caserío.*



Fuente: *Elaboración propia*

Figura 25. *Presencia de especies ferales.*



Fuente: *Elaboración propia*

Además de lo anterior, se pueden observar vertimientos directos hacia el cuerpo hídrico como se evidencia en la Figura 26, siendo esta una de las principales problemáticas de la zona.

Figura 26. Vertimiento directo hacia el Río Apulo.



Fuente: Elaboración propia

También se logra encontrar una de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM presentada en la Figura 27, en las rondas del Río Apulo, en área de San Joaquín, construida e instalada en el año 2018.

Figura 27. Estación hidrológica IDEAM en San Joaquín.



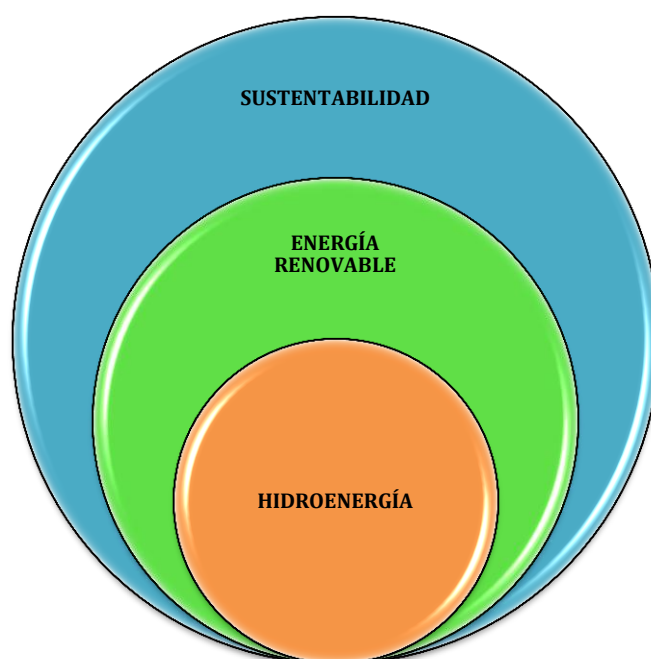
Fuente: Elaboración propia

En síntesis, la situación social del área de influencia directa del proyecto se define como una zona de expansión urbanística que se desarrolla a lo largo del río, afectando la calidad del agua y deteriorando los ecosistemas riparios con la presencia de residuos y especies que van generando unos espacios apropiados de baja calidad.

6 Marcos de referencia estado del arte- teórico-conceptual

Los marcos de referencia teórico, conceptual y estado del arte son de gran importancia para el desarrollo del ejercicio investigativo ya que son la base fundamental en cuando a los conocimientos previos que se deben tener en cuenta, partiendo de investigaciones recientes relacionadas con la temática a trabajar, referentes teóricos y diferentes conceptos; en la Figura 28 se presentan los tres grandes conceptos que abarca el proyecto de investigación, partiendo de la sostenibilidad o desarrollo sostenible tanto social, ecológico y económicamente, contribuyendo a este fin con la propuesta de implementación de energías renovables, en este caso la energía hidroeléctrica.

Figura 28. *Marco teórico conceptual*



Fuente: Elaboración propia

6.1 Estado del arte

En esta sección se presenta el interés de la utilización de energías renovables en pequeñas centros poblados, teniendo en cuenta los costos y las dificultades por suministro de energía eléctrica, el cual ha despertado la atención de buscar energías limpias y no convencionales para la solución de estas dificultades, teniendo en cuenta el hecho de generar procesos adaptativos de suministro energético en relación con el cambio climático, es decir, mediante la aplicación de fuentes energéticas bajas o nulas en carbono.

A continuación, se presentan los resultados de la revisión de información que sirve de soporte para la investigación que se desarrolló en el presente trabajo:

Partimos de *El protocolo de Kioto y su desarrollo en España. El fomento de las energías renovables y de la cogeneración eléctrica como instrumento de lucha frente al efecto invernadero*. En este documento, hacen mención a las necesidades energéticas actuales del mundo las cuales se satisfacen, básicamente, mediante la explotación de los llamados

combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. De toda la energía primaria necesitada para satisfacer la demanda energética del planeta, el 85% corresponde a combustibles fósiles, mientras que solamente un 8% corresponde a energías renovables. Ante la situación expuesta se hace imprescindible una importante limitación en el uso de los combustibles fósiles y la solución pasa por su sustitución por fuentes de energía limpias capaces de satisfacer la demanda energética. (López, 2000). Así como el *Acuerdo de París* el cual tiene como objetivo evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2°C respecto a los niveles preindustriales y busca, además, promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1,5°C. De esta manera, el Acuerdo recoge la mayor ambición posible para reducir los riesgos y los impactos del cambio climático en todo el mundo (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2016).

En el documento, *Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro*, se informa que la generación hidroeléctrica inicia en el año de 1882, en las rudimentarias instalaciones de las pequeñas centrales localizadas en Inglaterra, Estados Unidos y Francia. Los países que han agotado su potencial hidroeléctrico intentarán vender su tecnología y los países como México deberán incrementar sustancialmente la construcción de este tipo de centrales, por las grandes ventajas que ofrecen sobre otras fuentes de energía. (Gutiérrez & Frago, 2012).

Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático, es un informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático el cual ofrece una evaluación y un análisis pormenorizado de las tecnologías de la energía renovable y de su función actual y potencial en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Ofrece también información pertinente para la formulación de políticas para las instancias decisorias, sobre las características y el potencial técnico de los distintos recursos; la evolución histórica de las tecnologías; sus dificultades de integración y los efectos sociales y medioambientales de su uso, así como una comparación de los costos nivelados de la energía de las tecnologías de la energía renovable disponibles en el mercado y los costos recientes de energías no renovables. (Climático, 2011)

Por otra parte, el documento *Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y el Caribe: restricciones y perspectivas* da a conocer que, en América Latina, la eficiencia energética y las energías renovables presentan un potencial importante para mitigar los efectos negativos del consumo energético en continuo incremento, inducido tanto por el crecimiento económico, como por la transformación de las sociedades hacia modelos más energético-intensivos. También se evidencia que al menos durante dos décadas se ha debatido sobre la necesidad de dar a la eficiencia energética y a las energías renovables un lugar más prominente en las políticas energéticas de los países de América Latina, pero se ha logrado poco hasta el día de hoy a causa de diversos factores como las conductas individuales frente a las colectivas, la falta de voluntad política de los gobiernos, el poder o dominio ejercido sobre el mercado por parte de las empresas de electricidad, gas y petróleo y las modificaciones en la organización productiva de las cadenas energéticas conjuntamente con el establecimiento de políticas de precios y políticas fiscales, tanto para la energía eléctrica como para los combustibles que impactan de distintas formas a la eficiencia energética y la penetración de fuentes renovables. (Hugo Altomonte, 2003)

Diseño de una turbina hidrocínética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos, es un documento donde su objetivo principal es el diseño de una turbina, de pequeña potencia, para el aprovechamiento de la energía cinética de la corriente de agua de los ríos obteniendo de este

modo una energía limpia, segura y renovable. (García, 2013). También se tuvo como referente el documento, *Diseño eco-hidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos*, donde se evidencia cómo las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) son la posibilidad hidroenergética conveniente para Colombia, jugando un papel capital en el aprovechamiento de su potencial hidrogenerador. (Hernández, J. M., & Sanz, S. O, 2008)

Por otra parte, este trabajo presenta la tipología básica de procedimientos estimadores de caudal ecológico, donde se demuestra la posibilidad de compatibilizar la explotación hidroeléctrica con el mantenimiento de un estado ecológico aceptable, respetando unos caudales ecológicos que pueden ser estipulados en Colombia. Los nuevos criterios eco hidrológicos evaluadores de caudales ecológicos en PCHs posibilitan aprovechamientos rentables económicamente y defendibles en términos ambientales. (Hernández, J. M., & Sanz, S. O, 2008)

En la *Guía para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos de Navarro y Liévano, desarrollada en el año 2004*, se tratan los temas concernientes a la etapa de prefactibilidad para proyectos energéticos, desarrollándolos teóricamente y determinando su aplicabilidad en Colombia, se desarrollan temas como energías alternativas y estudios ambientales. (Navarro & Liévano, 2004).

Por otra parte, en el documento, *Pequeñas y micro centrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica de Vargas, Alarcón y Fajardo, desarrollado en el año 2011*, se pretende exponer la revisión realizada a la información existente de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), concentrando la descripción en tres aspectos: las turbinas más usadas, las características de los generadores y una breve descripción de la legislación colombiana respecto a la pequeña generación. Esta revisión también abarca una corta descripción de los elementos constitutivos y del desarrollo de las PCH en Colombia. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

Las turbinas más utilizadas en las implementaciones de PCH en Colombia, son Francis y Pelton, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Turbinas Instaladas en PCH en Colombia.

Tipo de turbina	PCH	Potencia instalada KW
Francis	61	69,008
Pelton	59	58,435
Combinados (F y P)	9	13,506
Michell Banki	7	245
Otros	3	1,383
Sin información	59	25,940
Total	193	168,517

Fuente: (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

En este caso, el documento *Agua y energía: producción hidroeléctrica en España*, informa que la participación del agua en el total de la electricidad producida ha ido disminuyendo. Las modernas tecnologías de regulación y control han aumentado la eficiencia de las centrales y del aprovechamiento del recurso agua. (Marín & Marín, 2010). En cuanto al documento, *Garantía de suministro y sostenibilidad del modelo energético*, da a conocer la situación energética actual, la cual se caracteriza por fuertes crecimientos de la demanda y una clara dependencia de los

combustibles fósiles (Serna, 2008), apoyado por los diferentes factores mencionados en el documento *Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y el Caribe: restricciones y perspectivas*. (Hugo Altomonte, 2003).

Este escenario se podría explicar en base a tres agentes:

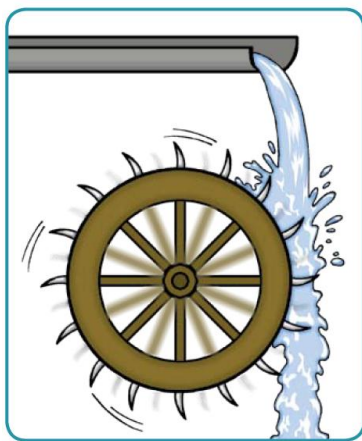
- Crecimiento económico de los países emergentes. Estos países, aunque han incrementado fuertemente su consumo energético en los últimos años, todavía están muy alejados de los consumos de los países desarrollados.
- Escaso desarrollo de alternativas energéticas no convencionales y de medidas de eficiencia y ahorro energético.
- Políticas energéticas que, en el caso de países emergentes, pasan en primer lugar por garantizar su rápido crecimiento económico, dejando en segundo plano otro tipo de consideraciones, como pueden ser la eficiencia energética o la utilización de tecnologías más limpias y menos contaminantes, pero más costosas. (Serna, 2008)

En la *Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá, Subcuenca Río Apulo*, presenta información clara y relevante para el desarrollo del presente proyecto en cuanto a la caracterización completa de la cuenca del Río Bogotá, y en específico de la Subcuenca del Río Apulo aportante de este en su parte baja, donde se presenta la topografía de la cuenca, caudales, datos meteorológicos, entre otros. (Ecoforest & ecológica, 2003)

6.2 Marco de referencia teórico

Una turbina hidroeléctrica es la encargada de transformar la energía mecánica en energía eléctrica como se puede observar en la Figura 29, por esto es de vital importancia saber elegir la turbina adecuada para cada sistema hidroeléctrico. (Antioquia, 2009).

Figura 29. *Hidroenergía*



Fuente: (Sánchez, y otros, 2010)

Debido a que el modelo de turbina Vortex propuesto para el presente estudio se basa en una micro central (MCH), las cuales se caracterizan por generar menos de 100 KW, es importante mencionar que estas a su vez se subdividen en pico, micro, mini y pequeña generación, y aunque los rangos pueden variar según el país y la organización ya que no se ha establecido un

criterio único para la subdivisión, en Colombia los intervalos establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas-CREG los cuales se pueden observar en la Tabla 6. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

Tabla 6. *Clasificación de las PCH, según la CREG.*

Potencia	Tipo PCH
0 – 100 KW	Microcentral
100 – 1000 KW	Minicentral
1000 – 10000 KW	Pequeña Central

Fuente: (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

Las PCH empezaron su expansión a principios del siglo XX, caracterizándose por ser tecnologías sencillas, de fácil adaptación e instalación, reducido costo de operación y mantenimiento (Ortiz Flórez, 2001), moderado o nulo impacto ambiental y larga vida útil, haciéndolas una solución viable para pequeñas poblaciones no interconectadas con condiciones de topografía, pluviometría e hidrológica convenientes como es el caso de la Inspección municipal de San Joaquín, que pueden reemplazar los generadores de diésel o incluso suministrar, por primera vez, electricidad a comunidades aisladas, para reducir la necesidad de abastecimiento de combustibles fósiles e impulsar el desarrollo socioeconómico en el medio rural (hidroeléctricas, 1994)

Adicionalmente estas PCH, en conjunto con los pequeños generadores eólicos y fotovoltaicos pueden ser sistemas económicamente atractivos, y con la extensión de redes pueden facilitar el acceso a la electricidad en pequeñas aldeas remotas. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

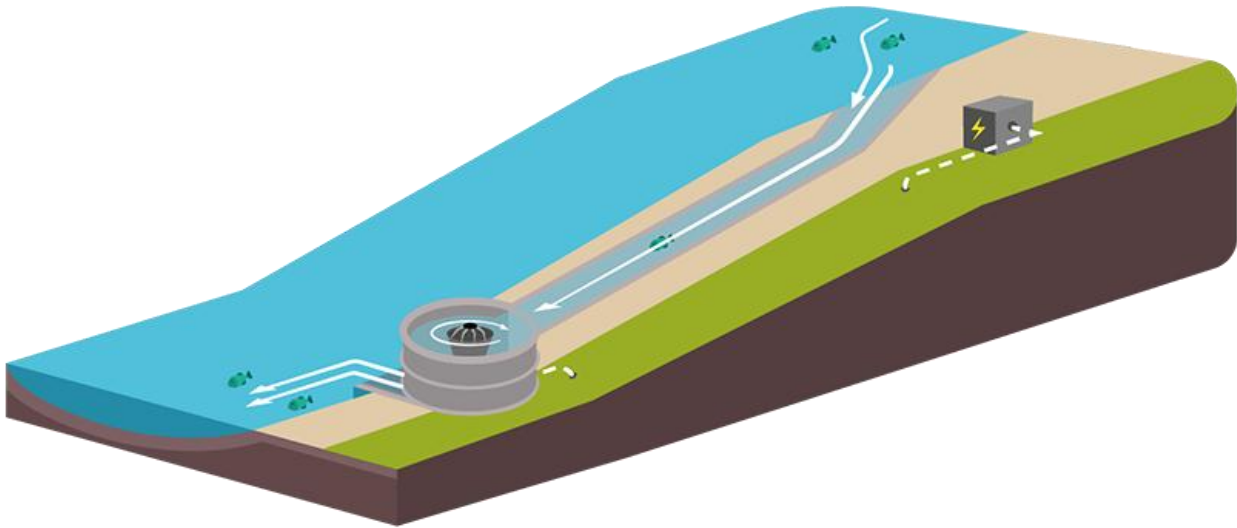
Para este caso de estudio se ha buscado adoptar la idea de una turbina hidroeléctrica de un tamaño reducido tal como se muestra en la Figura 30. Es importante mencionar que a pesar de la gran variedad de turbinas hidroeléctricas en el mercado actualmente, el presente estudio quiere recalcar el gran trabajo del prototipo que se adoptará en la investigación, aportado por Turbulent Hydro, presentado en la Figura 31 la cual se encarga de la creación de pequeñas hidroeléctricas, el lema de su empresa es “*Nos inspiramos en la naturaleza, entregamos energía limpia y descentralizada para todos a un muy bajo costo y sin dañar al medio ambiente.*” (Jasper & Geert, 2015)

Figura 30. *Modelo real propuesta por Turbulent Hydro.*



Fuente: (Jasper & Geert, 2015)

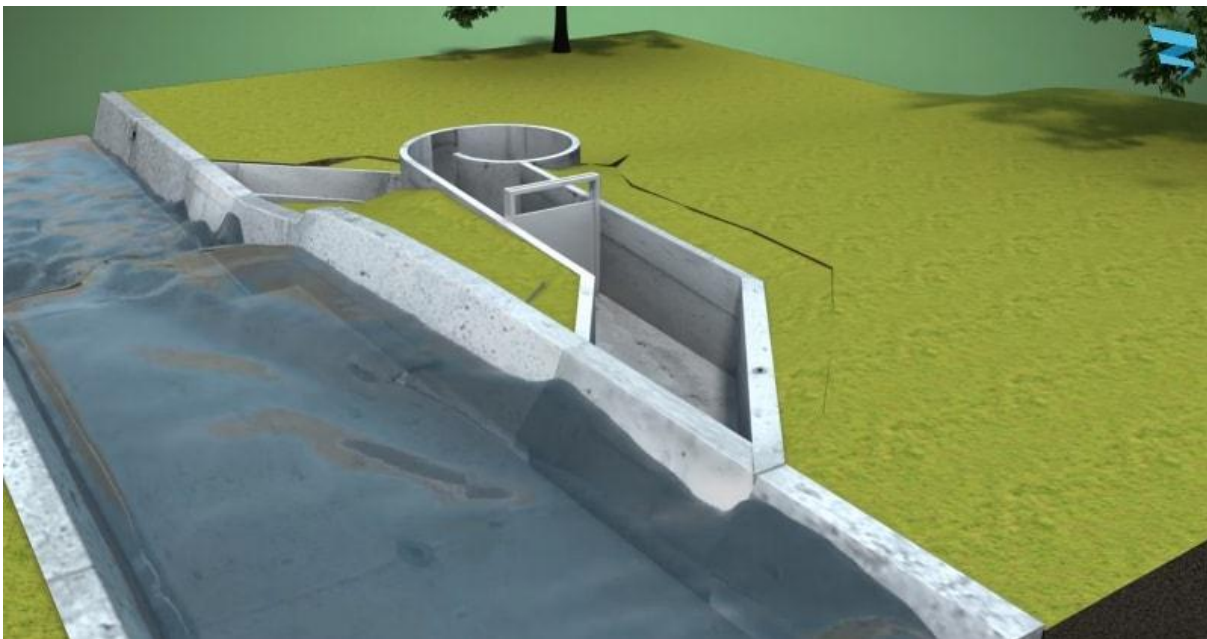
Figura 31. *Modelo Turbina propuesta por Turbulent Hydro.*



Fuente: (TURBULENT, 2018)

¿Cómo lo logra? El modelo propuesto por Turbulent Hydro denominada turbina Vortex, no realiza desvíos del cuerpo hídrico como se presenta en la Figura 32 en el que se vaya a instalar, está diseñada para que los peces puedan atravesar la turbina sin sufrir ningún daño, y finalmente la instalación de la turbina no conlleva una gran área que pueda afectar el ecosistema en donde se lleve a cabo.

Figura 32. *Modelo de implementación de la turbina propuesta por Turbulent Hydro.*



Fuente: (TURBULENT, 2018)

De esta manera se genera un proceso sustentable, el cual tiene por objetivo encontrar el equilibrio entre el medio ambiente y el uso de los recursos naturales, (Group, 2013) que, además, posee un ahorro económico en el servicio eléctrico para la población de la Inspección municipal junto con un mejoramiento en la calidad de vida a partir de un sistema óptimo energético, el cual se observa en la Figura 33.

Figura 33. Visión general del sistema de turbina propuesta por Turbulent Hydro.



Fuente: (Jasper & Geert, 2015)

De esta fuente energética, compuesta por los cauces de ríos y las caídas de agua es posible tomar la energía para transferirla a la turbina, la cual se denomina el potencial hidroeléctrico o potencial hidráulico y depende del caudal y de la altura desde la cual cae el fluido. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011) Se calcula a partir de la siguiente ecuación presentada en la Ecuación 1.

Ecuación 1. *Potencial hidráulico.*

$$P_h: d + g + h + Q$$

Fuente: (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

Donde:

d: Es la densidad y depende del fluido utilizado

g: Es la aceleración debido a la fuerza de gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

h: Es la altura desde la que se toma el agua y la boca de la turbina

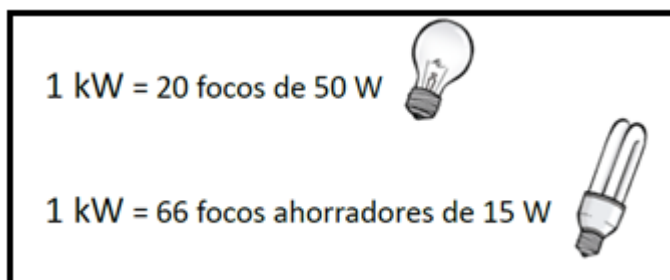
Q: Es el caudal o la relación de flujo volumétrico del fluido por unidad de tiempo. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

Las micro centrales hidroeléctricas tales como la turbina propuesta por Turbulent Hydro sobresalen ante los demás tipos de centrales hidroeléctricas debido a que se caracterizan por:

- No necesitan combustible ya que utilizan la fuerza del agua la cual es un recurso inagotable.
- No contaminan la capa de ozono debido a que no producen gases ni humo en su funcionamiento.
- Normalmente su trabajo es continuo debido al flujo libre de los cuerpos de agua. (Sánchez, y otros, 2010)

Por medio de la energía hidroeléctrica, se puede hacer una equivalencia con respecto a la cantidad de kW producidos por la turbina y la cobertura en bombillas como se puede apreciar en la Figura 34, lo cual sería la utilización principal prevista para ser satisfecha por el proyecto, que esta tendría sobre la población objeto de estudio.

Figura 34. *Equivalencia energía hidroeléctrica.*



Fuente: (Sánchez, y otros, 2010)

6.3 Marco de referencia conceptual

Inicialmente, el proyecto impulsa el uso de una energía limpia la cual se define como un sistema de producción de energía con exclusión de cualquier contaminación o la gestión mediante la que nos deshacemos de todos los residuos peligrosos para nuestro planeta. Las energías limpias son, entonces, aquellas que no generan residuos. (ERENOVABLE, 2018), esta se caracteriza por ser sustentable ambientalmente, lo que se refiere a la administración eficiente y racional de los recursos naturales, de manera tal que sea posible mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras. (México, 2007) y sostenible ambientalmente, la cual hace referencia a que las relaciones que se establezcan con el medio ambiente no conlleven la destrucción del mismo, de modo que, estas relaciones, sean “sostenibles” y perdurables a largo plazo. (Arriols, 2018)

Para el desarrollo del presente proyecto es de vital importancia conocer las características de una turbina, la cual es un elemento capaz de transformar en energía mecánica la energía cinética de una corriente de agua. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015), donde se conoce como energía cinética a la energía asociada a los cuerpos que se encuentran en movimiento, depende de la masa y de la velocidad del cuerpo y como energía mecánica a la producida por fuerzas de tipo mecánico, como la elasticidad, la gravitación, entre otras, y la poseen los cuerpos por el hecho de moverse o de encontrarse desplazados de su posición de equilibrio. (Miñarro, 2012).

Esta energía depende del caudal que se esté presentando, el cual es la cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, cañería, oleoducto, río, canal...) por unidad de tiempo. (Física práctica, 2019) Por otra parte, se tiene el caudal ecológico (CE), el cual en ríos y humedales es un instrumento de gestión que permite acordar un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos, que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad.

El CE concilia la demanda económica, social y ambiental del agua, reconoce que los bienes y servicios de las cuencas hidrológicas dependen de procesos físicos, biológicos y sociales, y que únicamente conservando el agua que éstos necesitan, se puede garantizar su provisión futura. En la práctica, el CE busca reproducir en alguna medida el Régimen Hidrológico Natural (RHN),

conservando los patrones estacionales de caudales mínimos y máximos temporada de sequías y lluvias, respectivamente, su régimen de crecidas y tasas de cambio de especial interés para la gestión de infraestructura hidráulica o hidroeléctrica. (Fondo Mundial para la Naturaleza WWF, 2010)

Uno de los conceptos más importantes a tener en cuenta es la hidroenergía la cual es la energía que tiene el agua cuando se mueve a través de un cauce o cuando se encuentra embalsada (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015), generando energía eléctrica la cual es causada por el movimiento de las cargas eléctricas en el interior de los materiales conductores (Miñarro, 2012), en este caso, esta generación de energía depende de algunas variables como lo son:

La pendiente, la cual es un declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de una vertiente. (Academic, 2010), por otra parte, según el decreto de recursos naturales, decreto 2811 de 1974, en el artículo 168 expresa que *“las pendientes son un recurso natural utilizable para generar energía, distinto e independiente del suelo y de las aguas, cuyo dominio se reserva la nación, sin perjuicio de los derechos adquiridos”*...y en el artículo 169 se expresa que *“la nación se reserva el dominio y el uso de la energía hidráulica que pueda ser desarrollada por la combinación de aguas y pendientes, aunque aquellas estén concedidas o se hallen afectadas a otros usos”* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014) y la precipitación, el cual es un fenómeno meteorológico el cual consiste en que una masa de aire ascienda y se enfría hasta saturarse y convertirse en gotitas de agua, cuando la nube se encuentra cargada de gotitas de agua y las condiciones ambientales lo propician, estas precipitan (Portillo, 2017).

7 Marco de referencia legal

A continuación, en la Tabla 7, se presenta la normatividad la cual abarca el tema de estudio del presente proyecto de investigación:

Tabla 7. Normatividad.

Normativa	Ratifica	Definición
Ley 697 de 2001	Ministerio de Minas y Energía	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. (Ministerio de Minas y Energía, 2001)
Ley 143 de 1994	Ministerio de Minas y Energía	Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética. (Ministerio de Minas y Energía, 1994)
Decreto 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Artículo 170. Las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, que deseen generar energía hidráulica, cinética o eléctrica, deberán solicitar concesión o proponer asociación. Para la concesión o la asociación se deberán tener en cuenta los indispensables factores de índole ecológica, económica y social. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)
		Artículo 171. Las normas sobre concesiones de aguas serán aplicables a las de uso de aguas y pendientes para generar energía hidráulica. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)
Ley 1715 de 2014	Ministerio de Minas y Energía	Regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Esta Ley, recién promulgada, será objeto de reglamentación por parte del Ministerio de Minas y Energía. (Ministerio de Minas y Energía, 1994)

Fuente: Elaboración propia

Según la legislación de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), el uso de energías renovables en Colombia fue estimulado por medio de la Ley 697 del 2001 (Ley de Energías Renovables), mediante la cual se incentiva el uso de energías no convencionales por medio de estímulos para la investigación a través de Colciencias y préstamos para educación por medio del Icetex. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

Además, mediante esta ley se crea PROURE: Programa de Uso Racional y Eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales, cuyo objeto es aplicar gradualmente programas para que toda la cadena energética cumpla permanentemente con los niveles mínimos de eficiencia energética, sin perjuicio de lo dispuesto en la normatividad vigente sobre medio ambiente y recursos naturales renovables. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011) En este contexto, el gobierno colombiano a través del Ministerio de Minas y Energía es el responsable del cumplimiento de esta ley a través de sus entidades adscritas como la Unidad de Planeación Minero Energética UPME, el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas IPSE y la CREG, la cual en lo que respecta a la operación de las PCH ha regulado que: (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

- A. Para la operación de las plantas menores a 10 MW en el Sistema de Transmisión Nacional (STN) si son interconectadas debe estar bajo la siguiente reglamentación:

Estas plantas no tendrán acceso al despacho central y por lo tanto no participarán en el mercado mayorista de electricidad. La energía generada por dichas plantas puede ser comercializada, teniendo en cuenta los siguientes lineamientos: (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

- B. La energía generada por una planta menor puede ser vendida a una comercializadora que atiende mercado regulado, directamente, sin convocatoria pública, siempre y cuando no exista vinculación económica entre el comprador y el vendedor. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

En este caso, el precio de venta será única y exclusivamente el precio en la Bolsa de Energía en cada una de las horas correspondientes, menos un peso moneda legal (\$ 1. 00) por kWh indexado conforme a lo establecido en la Resolución CREG-005 de 2001. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

La energía generada por una planta menor puede ser ofrecida a una comercializadora que atiende mercado regulado, participando en las convocatorias públicas que abran estas empresas. En este caso y como está previsto en la Resolución CREG-020 de 1996, la adjudicación se efectúa por mérito de precio. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

La energía generada por una planta menor puede ser vendida, a precios pactados libremente, a los siguientes agentes: usuarios no regulados, generadores, o comercializadores que destinen dicha energía a la atención exclusiva de usuarios no regulados. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

- C. Para la operación de las plantas menores de 10 MW en zonas no interconectadas ZNI no interconectadas al STN, deben cumplir los siguientes requisitos:

- a) **Calidad de la potencia:** Supone contar con equipos para el monitoreo de los valores de frecuencia y magnitud del voltaje, mantener la frecuencia dentro de un rango de más o menos el 1% del valor nominal de la frecuencia en los bornes de generación, mantener la tensión del voltaje dentro de un rango de más o menos el 10% del valor nominal del voltaje. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

Contar con los medios necesarios para obtener registros que permitan observar de manera horaria los valores de frecuencia y magnitud del voltaje, con una antigüedad de por lo menos tres meses, de manera que sea posible su vigilancia por parte de la Superintendencia de Servicios Públicos. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

Calidad del servicio técnico: Hasta que no se regule lo contrario, para aquellas localidades con servicio las 24 horas, el índice de desconexiones del servicio (DES) no podrá superar los índices vigentes para el grupo 4 de calidad del SIN. (Vargas, Alarcón, & Fajardo, 2011)

8. Metodología

Es de vital importancia conocer con claridad cada uno de los componentes para efectuar un diseño metodológico acertado, como lo son el alcance, limite, enfoque y método de investigación, los cuales se podrán resumir mediante la metodología propuesta para el respectivo desarrollo del proyecto. En las Tablas 8, 9 y 10 se podrán conocer las variables hidrológicas, sociales y económicas respectivamente del presente proyecto de investigación.

Tabla 8. Variables hidrológicas del proyecto de investigación.

Dimensión	Variable	Aspectos	Indicadores/ descriptores	Unidades	Técnicas	Instrumentos
HIDROLÓGICO	Agua	Calidad	ST, SST, SDT	mg/L	Prueba de jarras	Equipo de laboratorio: • Estufa • Desecador • Capsulas de porcelana. • Bomba de vacío • Entre otros
		Hidrometeorología	Afluentes	Cuerpos de agua/ zona objeto de estudio	Diagnostico hidrológico de la zona	• Mapa hidrológico • Referentes bibliográficos
			Precipitación	mm	Estaciones meteorológicas y limnimétricas aledañas a San Joaquín	Datos proporcionados por el IDEAM y CAR
		Volumen	Caudal	/	Toma de evidencia fotográfica	Fotografía
				l/t	Muestras de campo	• Molinete OTT C2 • Contador OTT Z400 • Revisión bibliográfica

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Variables sociales del proyecto de investigación.

Dimensión	Variable	Aspectos	Indicadores/ descriptores	Unidades	Técnicas	Instrumentos
SOCIAL	Trabajo en campo	Periodicidad	Número de visitas/mes	Cantidad	Recolección de información	- Cuaderno de notas - Revisión bibliográfica
	Accesibilidad	Ubicación	Área	Coordenadas	Identificación de puntos a intervenir	GPS de relieve
		Datos obtenidos	Número de actividades	Cantidad	Muestras de campo	- Molinete - Cuaderno de notas - Información de entidades
		Energía	Porcentaje de población con servicio	Número total de casas	Solicitud de información	Datos proporcionados por Enel-Codensa
	Entidades	Públicas	Número de entidades involucradas	Cantidad	Recolección de información	- Visitas de campo - Fuentes bibliográficas
		Grupos territoriales	Número de asociaciones	Cantidad	Recolección de información	- Visita de campo - Cuaderno de notas
	Población	Posibles beneficiarios	Número de casas	Cantidad	Análisis demográfico	- Referencia bibliográfica - Visita de campo

Fuente: Elaboración propia

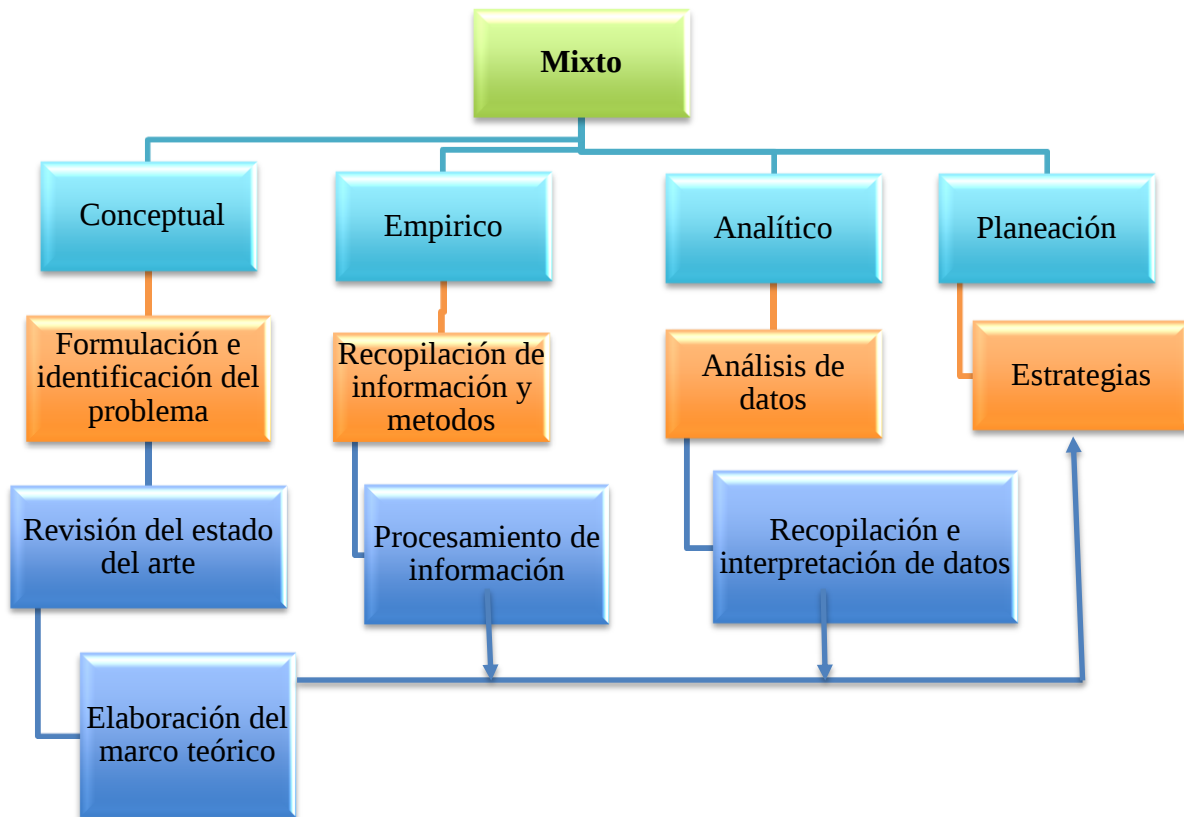
Tabla 10. Variables económicas del proyecto de investigación.

Dimensión	Variable	Aspectos	Indicadores/ descriptores	Unidades	Técnicas	Instrumentos
ECONÓMICO	Costos de inversión	Diseño	Turbina	\$/equipo	Consulta bibliográfica	Referencia bibliográfica
		Construcción	Canal e instalación de turbina	\$ obra	Consulta bibliográfica	Referencia bibliográfica
		Mantenimiento	Turbina	\$/MCH	Consulta bibliográfica	Referencia bibliográfica

Fuente: Elaboración propia

El enfoque de esta investigación es mixto ya que requerimos de información cualitativa, pero también de recolección y análisis de datos, lo cual se representa de una manera más detallada en los diversos componentes del desarrollo de la investigación que se evidencian en la Figura 35.

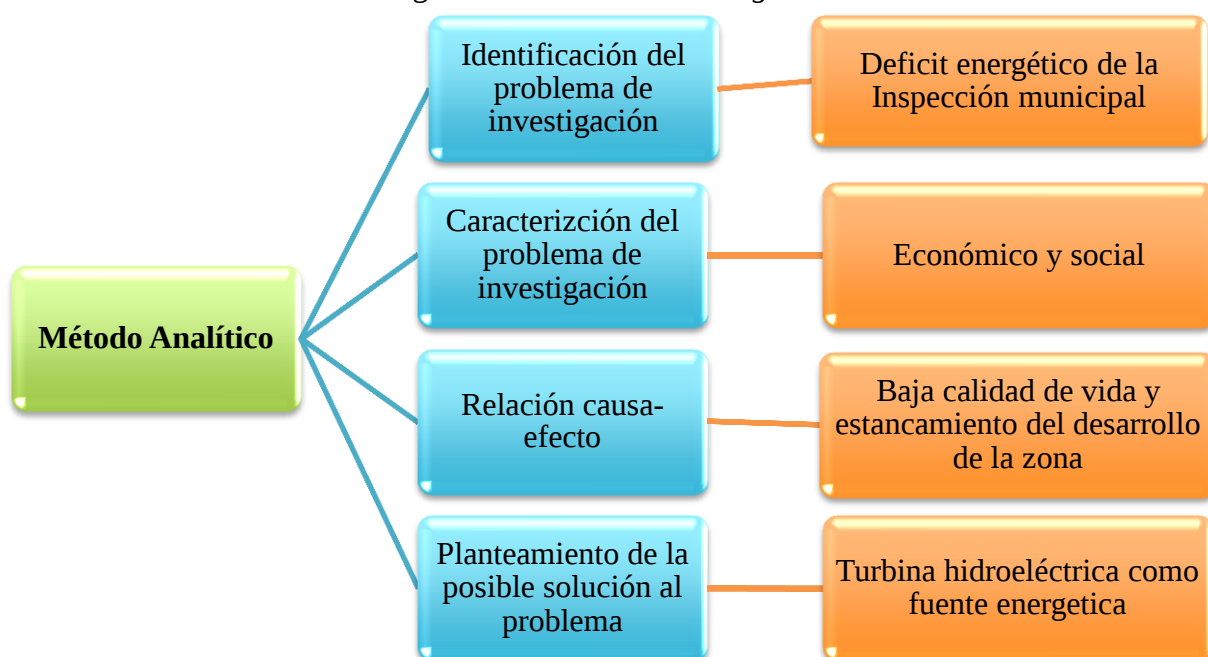
Figura 35. *Enfoque del proyecto de investigación.*



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al método de investigación, se hace referencia al método analítico, presentado en la Figura 36, debido a que por medio de este se plasman los pasos más relevantes de la metodología de investigación para poder tener éxito con el desarrollo del presente proyecto, como lo son la identificación del problema, el cual, en este caso es el déficit energético de la Inspección municipal de San Joaquín, los componentes que envuelven esta problemática, y así mismo las que se desencadenan a nivel social y económico principalmente para poder, plantear la posible solución a la problemática expuesta por medio de la implementación de las energías limpias.

Figura 36. Método de investigación.



Fuente: Elaboración propia

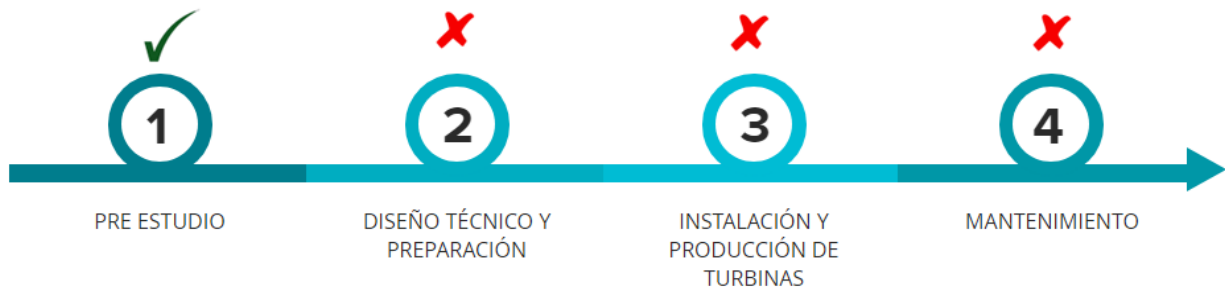
Por otra parte, se debe tener en cuenta el alcance de la investigación a realizar; los tipos de alcance son exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo. En este caso la investigación se relaciona con los alcances exploratorio y descriptivo.

Inicialmente el alcance exploratorio ayuda a obtener información concreta respecto a los impactos generados por el déficit de energía eléctrica en la zona de estudio, de igual manera se caracteriza por investigar nuevas temáticas y así poder generar información base para posteriores estudios.

El método descriptivo busca generar aportes en los ámbitos sociales, ambientales o económicos, partiendo de unas hipótesis sobre la prefactibilidad del diseño de la turbina hidroeléctrica en esta zona rural, se hace uso de la toma, recolección y análisis de datos, como los que se tomaron el Río Apulo (mediciones, caudal, pendiente, etc.), y así posteriormente generar una conclusión del trabajo de investigación realizado.

Otro de los componentes metodológicos es el límite presentado en la Figura 37, el cual se determinó con base en los recursos con los que se logra contar como el factor económico y tiempo. A partir de esto se delimito el proyecto de investigación en su primera fase hasta el estudio de prefactibilidad de la turbina que se pueda usar para la implementación de la respectiva micro central hidroeléctrica (MCH), y que logre satisfacer el déficit energético existente en la zona objeto de estudio.

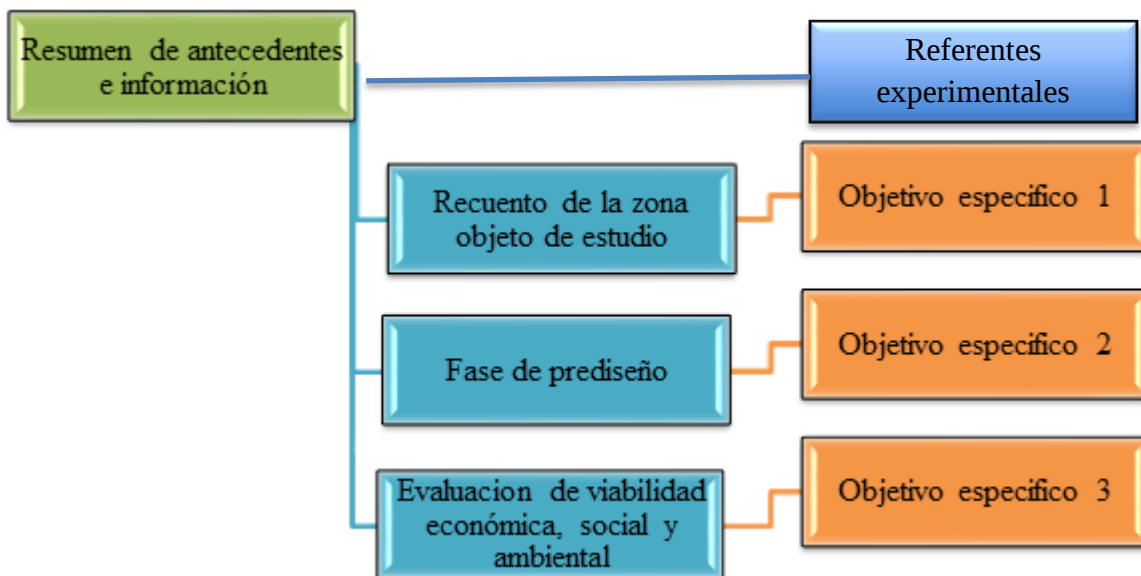
Figura 37. Límite de la investigación.



Fuente: (TURBULENT, 2018)

Para llevar a cabo la propuesta de prefactibilidad de la implementación de la turbina hidroeléctrica, se hace necesario realizar un diagnóstico de las condiciones del objeto de estudio y un análisis bibliográfico, específicamente como se evidencia en la Figura 38.

Figura 38. Metodología propuesta.



Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo del objetivo específico N°1 se tendrá como base las fuentes bibliográficas que proporcionen información sobre el estado actual de los cuerpos hídricos presentes en la zona de estudio, así como algunas visitas de campo para la determinación del caudal y toma de muestras de agua para el posterior análisis de sólidos totales, suspendidos y disueltos, con el fin de brindar una visión más completa del cuerpo de agua en estudio. En cuanto al objetivo N°2, se seleccionará la turbina a utilizar y se generará el rendimiento de ésta, partiendo de diferentes variables que permitirán obtener el porcentaje de generación eléctrica sobre el que consume la población objeto de estudio.

Por último, para el objetivo específico N°3 el cual es la viabilidad económica, social y ecológica de la implementación de la MCH, se realizará por medio de una matriz de impactos donde se presentarán los impactos positivos, nulos, o negativos que se pueden presentar en el diseño, desarrollo e implementación de la hidroeléctrica. Lo anterior se podrá especificar más a detalle en el plan de trabajo.

8 Plan de trabajo

Por otra parte, la recolección de datos consiste en obtener información sobre los atributos, cualidades conceptos (variables) relacionadas con los participantes, eventos, sucesos, casos, comunidades, objetos que participan en el presente estudio de investigación, para esto se debe tener en cuenta las técnicas e instrumentos como se puede ver en la Tabla 11.

Tabla 11. *Instrumentos y técnicas.*

OBJETIVOS	ACTIVIDADES	TÉCNICAS	INSTRUMENTOS	RESULTADOS ESPERADOS
Estudiar la hidrografía aledaña a la Inspección municipal de San Joaquín y sus potencialidades energéticas.	- Reconocimiento de los cuerpos hídricos de la zona. - Toma de medidas del cuerpo hídrico seleccionado. - Medición del caudal.	- Listado de cuerpos hídricos permanentes e intermitentes del municipio. - Caracterización cualitativa y cuantitativa de lo realizado en campo. - Recopilación de información técnica. - Prueba de jarras.	- Contador OTT Z400 - Micro molinete OTT C2 - Cronometro - Calculadora - Agenda de notas - Cuerda - Metro - GPS de relieve - Mapa hidrográfico de la zona. - Equipo de laboratorio.	Recopilar la información de los cuerpos hídricos de la zona, los cuales me permitan definir el cuerpo de agua objeto de estudio y la potencialidad energética de los mismos.
Identificar la cantidad de energía que potencialmente puede proporcionar una turbina hidroeléctrica, en relación a la satisfacción de las necesidades de la Inspección municipal de San Joaquín.	- Identificación de fuentes hídricas. - Determinar el tipo de turbina que se va a emplear. - Cuantificar el consumo energético de la Inspección municipal.	- Diagnostico energético actual de la zona. - Análisis del funcionamiento y rendimiento de la turbina.	- Agenda de notas. - Mapa hidrográfico de la zona. - Calculadora - Turbina - Datos proporcionados de consumo energético de la zona por parte de Enel-Codensa.	Definir el tipo de turbina a utilizar para cubrir el déficit energético, partiendo de los datos proporcionados por Enel-Codensa del consumo energético de la población objeto de estudio.
Evaluar la viabilidad económica, social y ecológica para la implementación de un modelo de turbina hidroeléctrica como generador energético.	- Evaluación socioeconómica de la Inspección municipal. - Identificación de los beneficios económicos, sociales y ecológicos de la implementación de la turbina.	- Análisis integral de la prefactibilidad del proyecto. - Matriz de impactos.	- Agenda de notas - Computador	Obtener resultados positivos en cuanto a la viabilidad social, económica y ecológica de la prefactibilidad del presente proyecto.

Fuente: Elaboración propia

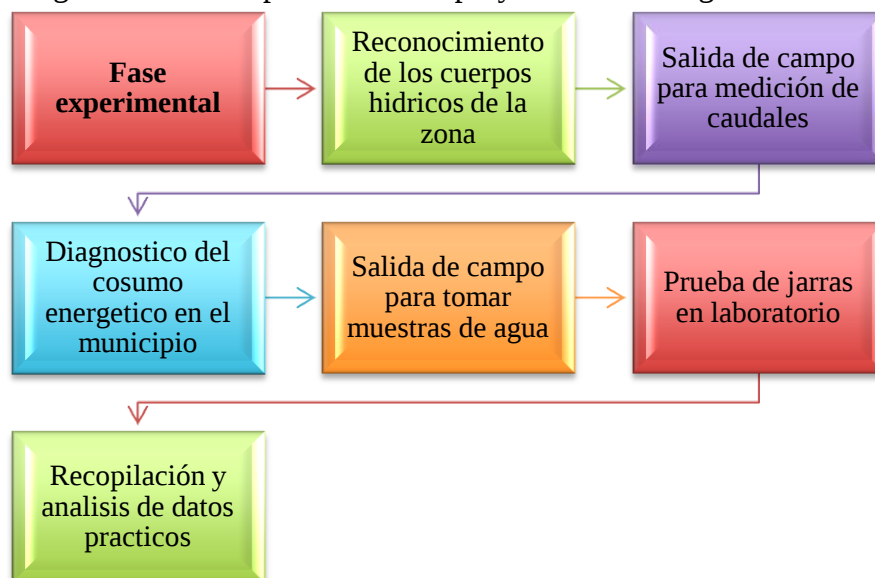
Además, se presenta de manera desglosada las fases de desarrollo del presente proyecto de investigación en las Figuras 39, 40 y 41, sin embargo, en el Anexo 1 se pueden detallar las actividades de manera temporal en el cronograma de actividades.

Figura 39. Fase inicial del proyecto de investigación Fase I.



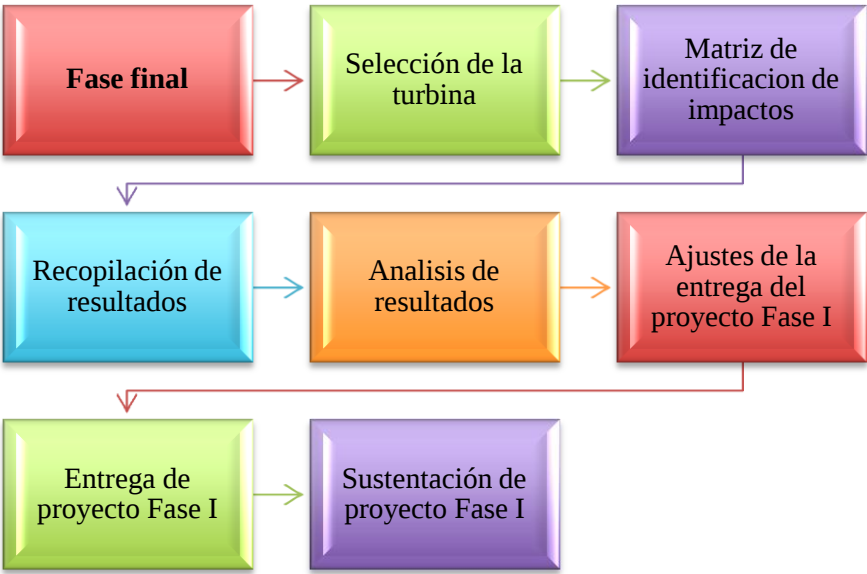
Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Fase experimental del proyecto de investigación Fase I.



Fuente: Elaboración propia

Figura 41. Fase final del proyecto de investigación Fase I.



Fuente: Elaboración propia

10. Resultados, análisis y discusión

En este capítulo se describe las actividades realizadas e instrumentos utilizados para desarrollar cada uno de los objetivos específicos junto con su respectivo análisis y discusión.

10.1 Objetivo específico N° 1: Estudiar la hidrografía aledaña a la Inspección municipal de San Joaquín y sus potencialidades energéticas.

A continuación se presentaran los resultados de las variables propuestas en la dimensión hidrológica como la hidrometeorología, la cual se refiere a los cuerpos de agua presentes en la zona objeto de estudio con sus características topográficas, climáticas, entre otras que influyen en el sistema propuesto; así como la calidad la cual en este caso abraza el análisis de los sólidos totales, sólidos suspendidos y disueltos presentes en una muestra de agua del Río Apulo a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín y su influencia en el volumen entendido como el estudio de caudales.

10.1.1 Dimensión hidrológica

La subcuenca del Río Apulo se localiza al sur de la Sabana de Bogotá y forma parte de la cuenca media baja del Río Bogotá; presenta un rango altitudinal muy pronunciado que varía de 3.200 msnm a 425 msnm permitiendo topográficamente relieves montañosos y planos, bajo condiciones climáticas variables entre frío húmedo, seco, medio húmedo y cálido seco.

Se enmarca en los municipios de Anapoima, Apulo, Anolaima, Bajaca, Cachipay, Zipacón, La Mesa y en menor proporción en Quipile, Albán, Facatativá, Jerusalén, Tena y Tocaima. (Ecoforest & ecológica, 2003), en la Tabla 12 se observa la distribución del Río Apulo en los diferentes municipios y su localización se observa en la Figura 42.

Tabla 12. Área del Río Apulo distribuida en los diferentes municipios.

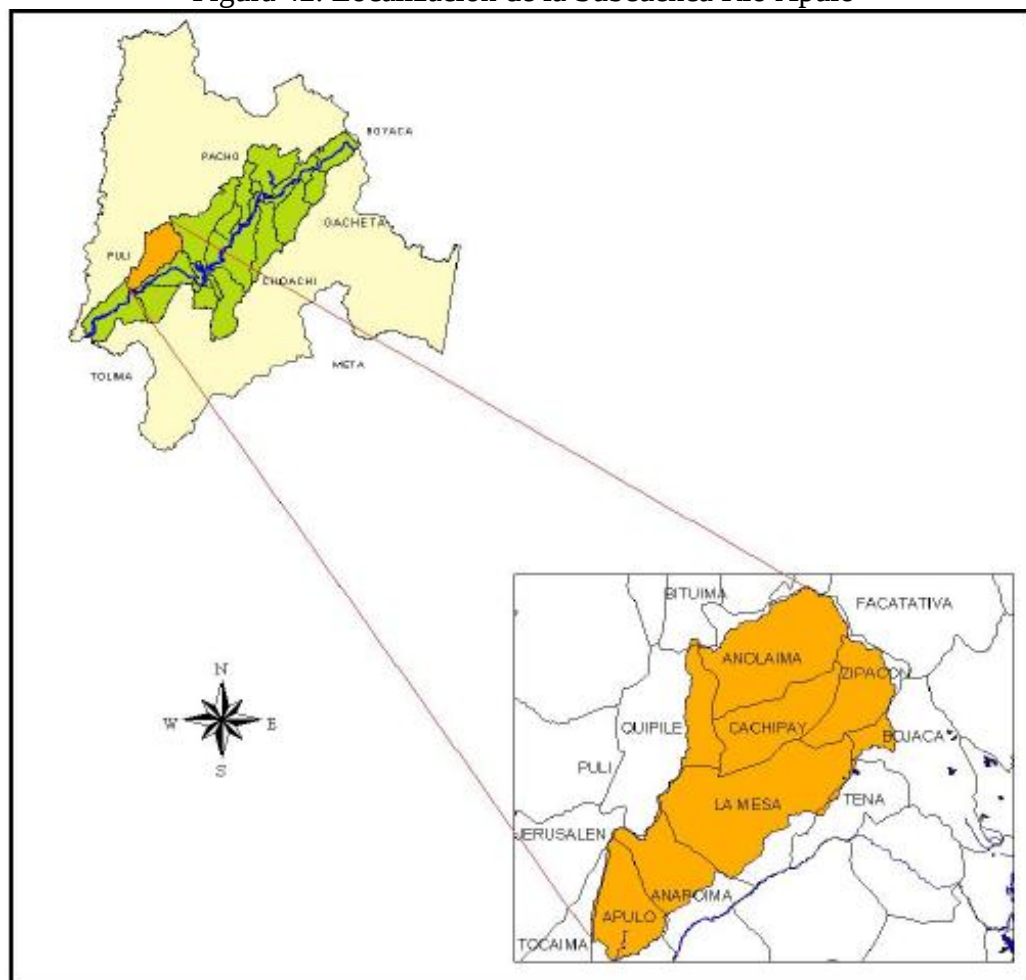
Municipio	Área (Hectáreas)			
	Total	Urbana		Rural
		Continua	Discontinua	
Zipacón	5427,31	13,81	7,14	5406,35
Anolaima	11001,93	45,55	84,29	10872,10
Cachipay	5388,42	30,75	93,08	5264,59
La Mesa	12202,11	132,29	140,61	11929,21
Anapoima	4691,00	/	69,10	4621,90
Apulo	5051,71	29,72	65,47	4956,52
Bojacá	1136,226	/	/	1136,26
Quipile	3129,98	/	/	3129,98
Tena	202,28	/	/	202,28
Bituima	82,76	/	/	82,76
Facatativá	81,45	/	/	81,45
Albán	49,66	/	/	49,66
Tocaima	35,88	/	/	35,88
Jerusalén	24,74	/	/	24,74

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

El Río Apulo nace en el Distrito de Manejo Integrado Cerro Manjui en el municipio de Facatativá y desemboca en la margen derecha del Río Bogotá a la altura del municipio Apulo,

tiene como afluentes principales los Ríos Curí, Cachipay, Doña Juana y las quebradas Agua Fría, San Miguel, Las Micas, Salada, La Carbonera, El Limonal y Seca. (Ecoforest & ecológica, 2003)

Figura 42. Localización de la Subcuenca Río Apulo



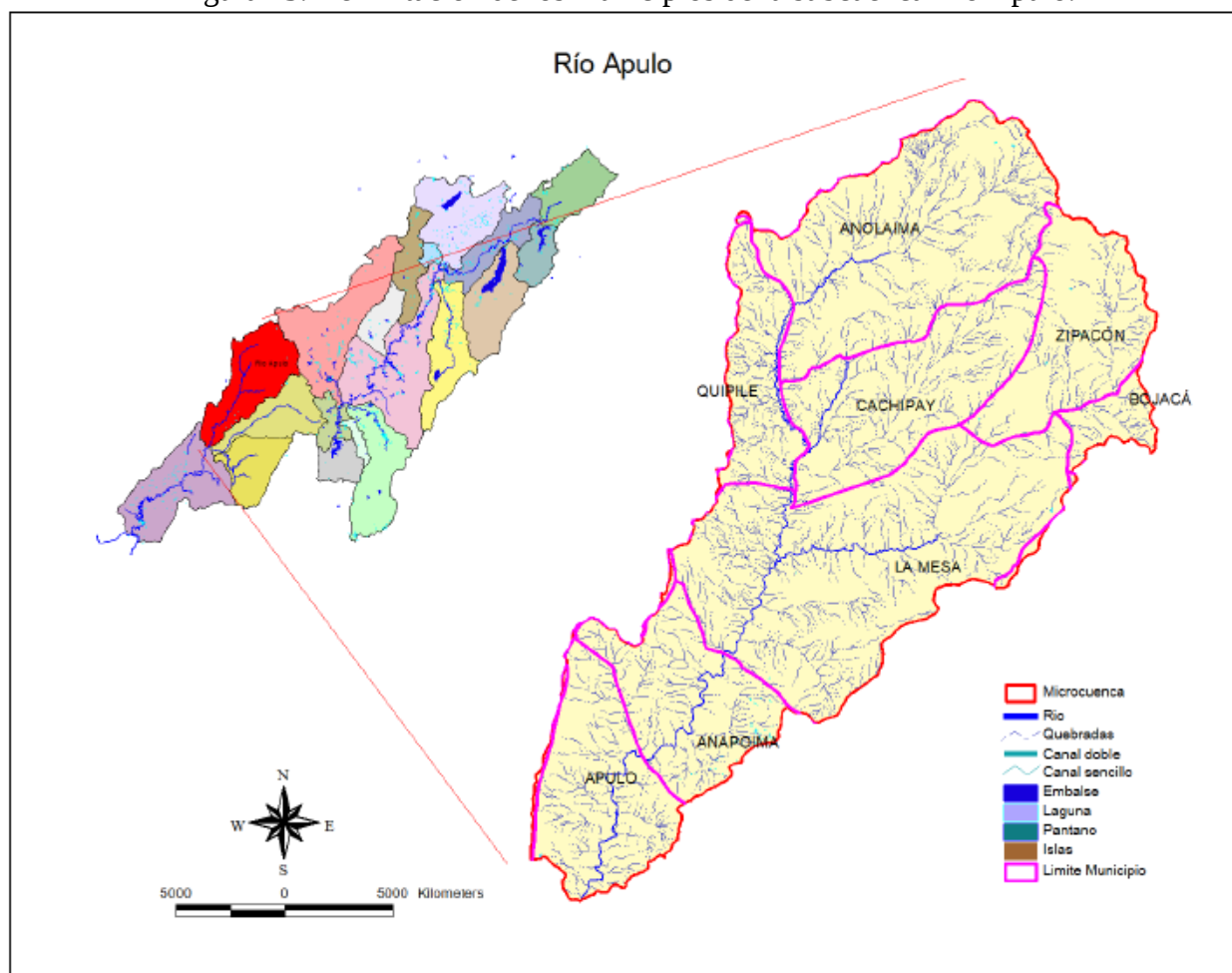
Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

La zona posee grandes paisajes de montaña estructural erosional, valle aluvial y registra valores medios de precipitación de 1.300 mm, evaporación de 1.200 mm y temperatura de 20°C, en donde se destacan dos periodos húmedos en los meses de marzo, abril, mayo y los meses de octubre y noviembre. (Ecoforest & ecológica, 2003)

La calidad del recurso hídrico de la subcuenca se afecta por las descargas de aguas servidas del municipio de Zipacón y la disposición de residuos sólidos en las riberas del Río Apulo. Sin embargo, el agua de esta subcuenca es utilizada para el riego de productos agrícolas y el consumo animal. (Ecoforest & ecológica, 2003)

La importancia ambiental de la subcuenta se evidencia con la presencia de ecosistemas de gran importancia debido a la diversidad existente como la Laguna Verde en el municipio de Zipacón, el Río Curí en el municipio de Anolaima, el Bosque andino de Peña Negra, Río Bahamón en el municipio de Cachipay, el Río Apulo en la desembocadura al Río Bogotá y la laguna Puerto Rico en el municipio de Zipacón. (Ecoforest & ecológica, 2003), la delimitación de los municipios por los cuales pasa el Río Apulo, se presenta en la Figura 43.

Figura 43. Delimitación de los municipios de la subcuenca Río Apulo.



Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

10.1.1.1. Topografía y pendientes

La subcuenca Río Apulo tiene una extensión de aproximadamente 485 Km² y se localiza en los municipios de La Mesa, Anolaima, Zipacón, entre otros, en altitudes que oscilan entre los 400 y 3.200 msnm siendo la subcuenca con el rango altitudinal más pronunciado de la cuenca del Río Bogotá. La altitud media de la subcuenca se encuentra alrededor de los 1.380 msnm. (Ecoforest & ecológica, 2003)

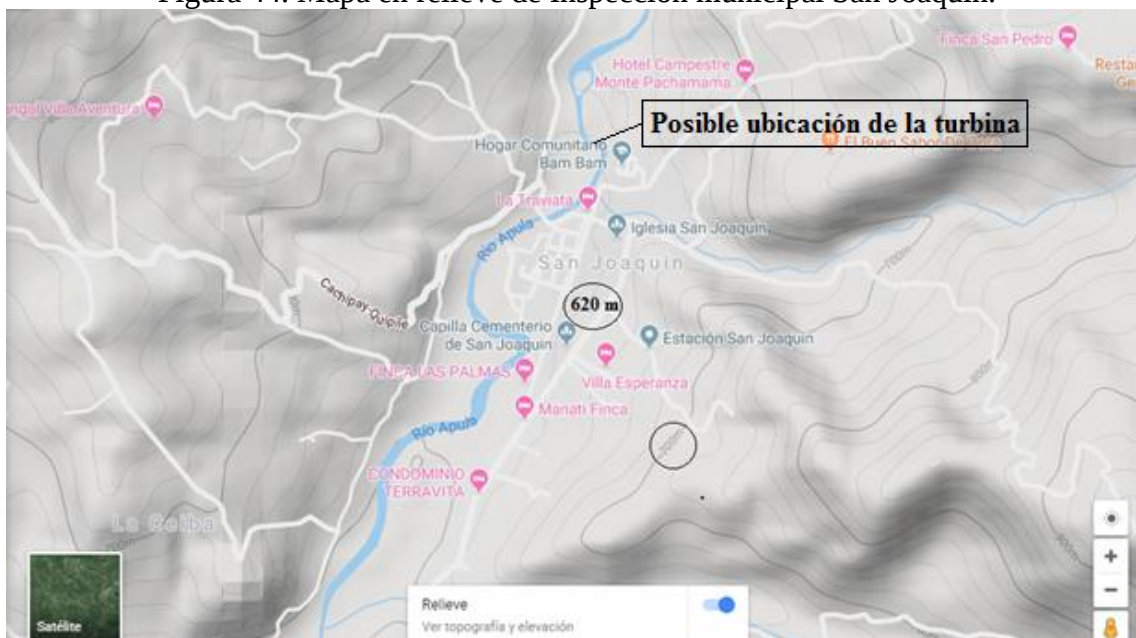
La subcuenca se caracteriza por presentar topográficamente relieves montañosos principalmente en su parte occidental con predominio de relieves ondulados, fuertemente ondulados, escarpados y muy escarpados constituyendo 85.5% del área total. (Ecoforest & ecológica, 2003)

En la parte central de la subcuenca se concentran las zonas de relieve más suave asociadas a la planicie aluvial del Río Apulo con predominio de relieves planos a ligeramente ondulados, aunque solo constituyen el 5.0% del área total. (Ecoforest & ecológica, 2003)

La planicie aluvial del Río Apulo es por lo general bastante angosta y solo se ensancha en la parte baja de la subcuenca sobre la confluencia con el Río Bogotá en cercanías del área urbana del municipio de Apulo. (Ecoforest & ecológica, 2003)

Sobre la subcuenca se asientan las cabeceras municipales de La Mesa, Cachipay. Anolaima, Zipacón, Quipile y Apulo y otros centros poblados de importancia como San Javier y **San Joaquín** en el municipio de La Mesa. (Ecoforest & ecológica, 2003), en la Figura 44 se presenta el mapa en relieve de la Inspección municipal de San Joaquín lográndose detallar los cambios de pendiente en el terreno.

Figura 44. Mapa en relieve de Inspección municipal San Joaquín.



Fuente: (Google Maps, 2019)

La Inspección municipal de San Joaquín se encuentra en una cota de 620 m, teniendo cambios de pendiente cada 20 m debido a la topografía del terreno, lo cual lo hace una zona muy efectiva para la generación de un mayor caudal en sus cuerpos de agua, por ende, mayor proporción de energía eléctrica.

Las zonas con predominio de relieve ondulado e inclinado se asientan sobre el piedemonte colindando con la planicie aluvial y constituyen el 9.4% del área. La Tabla 13 presenta la distribución territorial de los diferentes rangos de pendiente para la subcuenca Río Apulo. (Ecoforest & ecológica, 2003)

Tabla 13. Distribución territorial de los diferentes rangos de pendiente para la subcuenca Río Apulo.

Grado (%)	Relieve	Símbolo	Área (ha)	Porcentaje %
0-3	Plano, plano	A	541.36	1.12

	cóncavo y ligeramente plano			
3-7	Ligeramente inclinado, ligeramente ondulado	B	1891.12	3.9
7-12	Ondulado, inclinado	C	4545.86	9.37
12-25	Fuertemente ondulado, fuertemente inclinado	D	18138.27	37.39
25-50	Fuertemente quebrado	E	17036.21	35.12
50-75	Escarpado	F	4871.90	10.04
>75	Muy Escarpado	G	1480.77	3.05
/	Embalses principales	CA	/	/

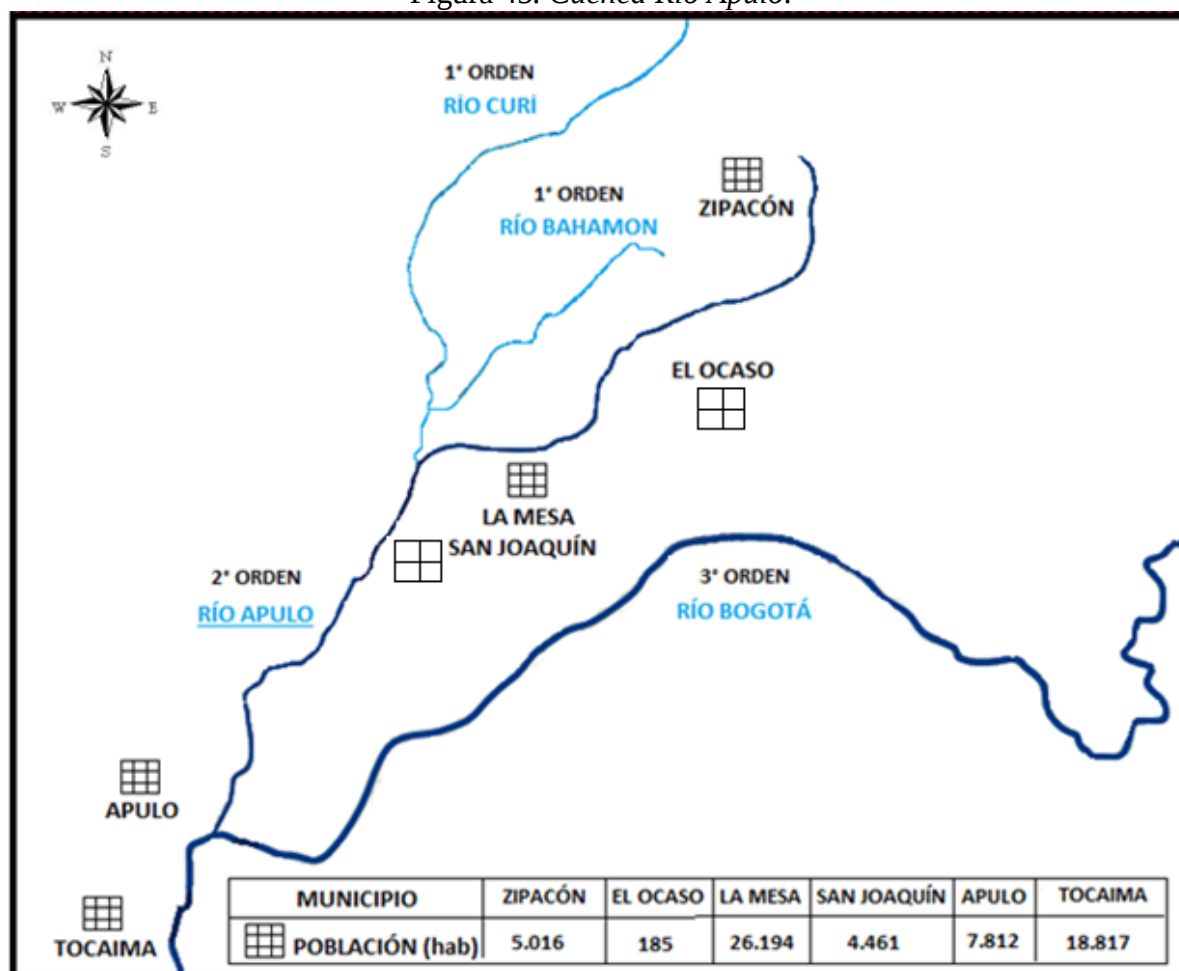
Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Hacia el Río Bogotá drenan las aguas del casco urbano de La Mesa, como las quebradas Guayacana, San Antonio, Lagunas, entre otros. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)

La cuenca del Río Apulo se conforma por subcuencas, las cuales se evidencian en la Figura 45 y se presentan a continuación:

1. Conformada por la cuenca del Río Curí y su confluencia con el Río Apulo, la cual presenta valores de caudales mínimos anuales de 1.840 l/s, caudales medios anuales de 5.216 l/s y caudales máximos anuales de 7.897 l/s, para un periodo multianual de 20 años. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)
2. Conformada por la confluencia del Río Curí con el Río Apulo, presentando valores de caudales anuales mínimos de 3.193 l/s, medios de 8.908 l/s y máximos de 13.313 l/s, para un periodo multianual de 20 años. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)
3. Conformada por la cuenca del Río Apulo y su confluencia con el Río Curí. Presenta caudales mínimos de 1.301 l/s. medios de 3.692 l/s y máximos de 5.416 l/s, para un periodo de 20 años. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)
4. Se conforma, para el municipio, por el aporte de quebradas del margen derecho del Río Bogotá, en límites con el municipio del Colegio. No se tienen datos de caudales por estar en el límite municipal, parte baja y ser un recurso hídrico contaminado. (Alcaldía municipal de La Mesa, Cundinamarca, 2000)

Figura 45. Cuenca Río Apulo.



Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que algunos de estos cuerpos hídricos, específicamente las quebradas mencionadas anteriormente, son intermitentes y solo se evidencia recurso hídrico en temporada de lluvias, el único cuerpo de agua fijo es el Río Apulo, esta es una de las razones por las cuales es el área de objeto de estudio y no otro cuerpo de agua que pase por la Inspección municipal.

10.1.1.2. Morfometría de la subcuenca Río Apulo

La caracterización de los cuerpos de agua está estrechamente relacionada con el caudal de estos, en la Tabla 14 se presentan parámetros morfométricos de la subcuenca tales como:

- **Área:** El área de drenaje es el área plana sobre una proyección horizontal, incluida dentro de su divisoria de aguas (Km²).
- **Cota mayor:** Es la mayor altura a la cual se encuentra la divisoria de aguas (msnm).
- **Cota menor:** Es la cota a la cual entrega sus aguas al Río Bogotá (msnm).

- **Pendiente media:** La pendiente del cauce principal está definida como la variación de altura por unidad de longitud del fondo del cauce principal (m/m).
- **Perímetro:** Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de aguas (Km).
- **Patrón de drenaje:** Es la característica del drenaje que sigue el curso principal.
- **Longitud de drenajes:** Es l longitud total de los cursos de agua de la cuenca (m).
- **Densidad de drenajes:** Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y su área total y su expresión matemática es la siguiente:

Ecuación 2. *Densidad de drenajes*

$$Dd = \frac{Ld}{A}$$

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

- **Longitud del cauce principal:** Se define como el recorrido total del cauce principal, hasta su desembocadura (m).
- **Altura media de la cuenca:** La elevación media está definida en msnm como:

Ecuación 3. *Altura media de la cuenca.*

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (CM_i A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Donde:

CM: Cota media del intervalo i

A_i = Área del intervalo i

n= Numero d intervalos

- **Longitud axial:** La longitud axial de la cuenca se mide cuando se sigue el curso de agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la hoya (m).
- **Ancho medio:** El ancho medio se obtiene cuando se divide el área por la longitud axial de la hoya, de acuerdo con la siguiente expresión:

Ecuación 4. *Ancho medio de la cuenca.*

$$Kf = \frac{A}{L}$$

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

- **Índice de Gravelius:** Es la relación entre el perímetro de la cuenca (longitud de la divisoria de aguas) y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la de la cuenca, y se expresa según la siguiente relación:

Ecuación 5. *Índice de Gravelius*

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

- **Índice de Torrencialidad:** Resulta de dividir el número de cauces de primer orden (torrentes iniciales entre la superficie de la cuenca). Un índice alto, indica torrencialidad y rápida evacuación de caudales y sedimentos. De acuerdo con lo anterior, su cálculo se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 6. *Índice de Torrencialidad*

$$L_T = \frac{(\sum L_1)}{A}$$

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

- **Tiempo de concentración:** Está íntimamente relacionado con la forma de la cuenca y se define como el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que la totalidad de la cuenca contribuya al drenaje, o en otras palabras, el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la divisoria de aguas hasta llegar a la salida de la misma, y para su estimativo, se empleó la fórmula de Kripich, de acuerdo con la siguiente expresión matemática:

Ecuación 7. *Tiempo de concentración*

$$T_c: (11.9 \left(\frac{\left(\frac{L}{1.6} \right)^3}{0.3 h} \right)^{0.385}$$

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (horas)

L: Longitud del cauce principal (Km)

h: Diferencia de elevación entre los límites superior e inferior de la cuenca (m)

Tabla 14. Morfometría de la subcuenca Apulo.

CUENCA	Pendiente media			Área (Km ²)	Perímetro (Km)	Patrón de drenaje	Longitud de drenajes (Km)	Densidad de drenaje (m/Km ²)	Longitud de cauce principal (m/Km)	Pendiente media cuenca (m/Km)	Altura media cuenca (m)	Forma de la cuenca			Índice de torrencialidad	Tc (minutos)	Velocidad (m/s)
	Cota mayor (m)	Cota menor (m)	Pendiente media (m/m)									Longitud axial cuenca (m)	Ancho cuenca (m)	Índice de Grabelius			
Rio Apulo	3.200	425	0,06	485	123	Sp	1.211	2.496	56	21,72	1.813	43.084	13.874	1,58	2,61	587	1,58

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

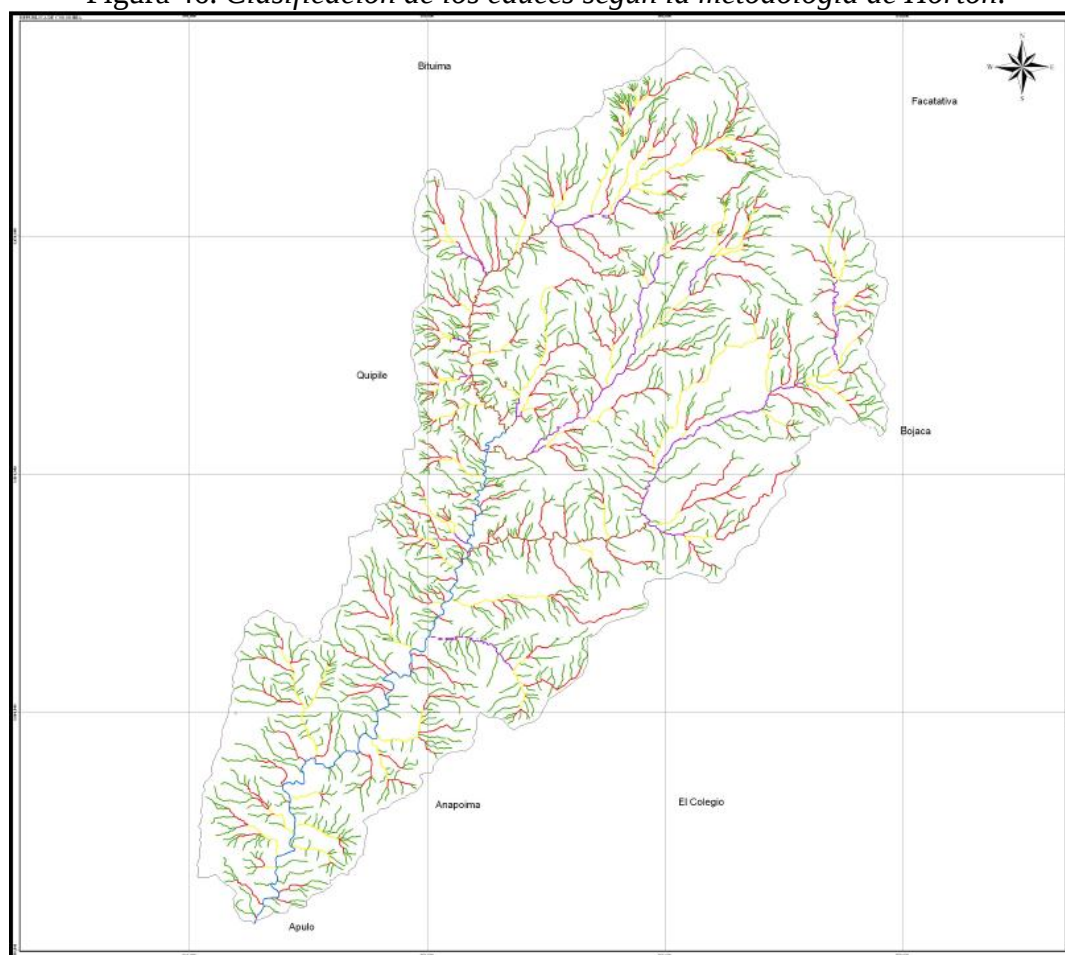
A partir de la tabla anterior, se puede decir que la cuenca es de tipo alargado, encontrándose en sus cabeceras sobre la cota 3.200 msnm, y su cota más baja sobre los 425 msnm. La altura media está en los 1.813 msnm, presentando un drenaje superficial rápido y de tipo sinuoso. (Ecoforest & ecológica, 2003)

10.1.1.3. Sistemas de drenaje

El sistema de drenaje en general para toda la subcuenca, es de tipo superficial por medio de cauces naturales, algunos canales y quebradas que tributan a los ríos principales, que son el Curí y el Bahamón, que confluye y conforman el Apulo, siendo este último el principal colector de la subcuenca, drenando por una planicie de mediana pendiente y luego entrega sus aguas directamente al Río Bogotá, que recoge las aguas de toda la subcuenca, siendo el cauce principal de tipo sinuoso, al igual que sus tributarios. (Ecoforest & ecológica, 2003)

En la Figura 46 se presenta la clasificación de los cauces según la metodología de Horton, con sus correspondientes convenciones en la Tabla 15.

Figura 46. Clasificación de los cauces según la metodología de Horton.



Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Tabla 15. Convenciones clasificación de los cauces según metodología Horton.

Leyenda		
Clasificación según Horton		
Símbolo	Clasificación	Longitud (m)
	1	772601.680
	2	268780.832
	3	129877.877
	4	48695.562
	5	27508.032
	6	33855.146

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

10.1.1.4. Precipitación

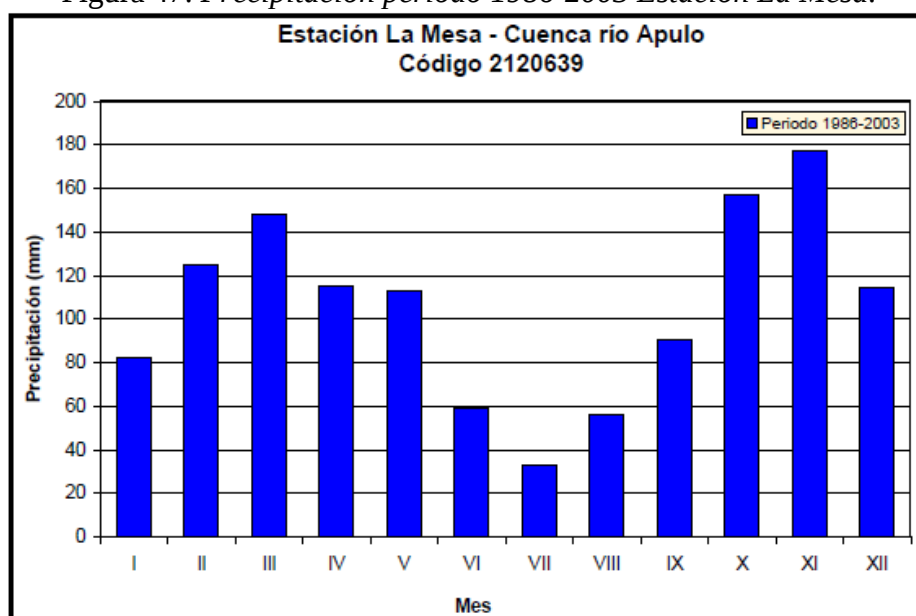
La subcuenca del Río Apulo, cuenta con información hidrométrica directa, registrada en varias estaciones limnimétricas, localizada en las cabeceras de la subcuenca, en varios de los tributarios y en la parte baja de la misma. (Ecoforest & ecológica, 2003). En la Tabla 16 se presentan los datos de precipitación proporcionados de una estación limnimétrica de la CAR, ubicada en el municipio de La Mesa, Cundinamarca, en un rango de tiempo del 1986-2003, con su respectiva grafica en la Figura 47.

Tabla 16. *Valores totales mensuales de precipitación, estación CAR en La Mesa, Cundinamarca, periodo 1986-2003 (mm)*

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Valor anual (mm)
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1986	85,0	185,0	156,0	138,0	135,5	70,5	19,0	11,0	75,0	246,9	206,8	33,1	1361,8
1987	59,1	32,3	101,7	89,4	186,7	9,0	71,9	22,4	124,5	248,5	186,0	81,7	1213,2
1988	43,7	89,5	37,9	90,7	65,0	178,4	44,9	273,2	44,2	203,7	378,5	190,2	1639,9
1989	185,0	217,1	256,9	55,7	214,3	42,6	28,8	73,4	138,2	280,6	182,3	159,8	1834,7
1990	57,9	294,0	216,1	59,7	178,4	40,9	18,3	15,4	28,3	198,3	178,5	168,7	1454,5
1991	85,5	39,3	156,3	125,5	52,8	45,5	22,7	47,6	160,1	65,0	216,2	109,9	1126,4
1992	64,0	65,8	46,6	35,8	57,6	48,4	25,0	21,0	49,8	46,2	209,1	155,2	824,4
1993	189,0	170,0	55,1	150,3	90,2	22,0	28,2	20,3	128,8	48,2	238,7	54,0	1194,8
1994	101,5	120,7	101,6	232,6	124,9	23,2	21,8	56,0	45,3	180,1	204,2	35,0	1336,9
1995	3,6	73,7	136,9	0,7	109,4	84,4	64,4	178,7	88,6	106,0	182,2	154,1	1182,7
1996	150,9	80,6	192,1	77,5	187,7	142,2	83,0	77,6	64,8	130,2	128,9	141,3	1456,8
1997	162,4	51,2	186,1	230,6	67,2	43,1	5,9	5,3	95,9	136,1	135,9	57,0	1176,7
1998	1,2	184,35	177,0	198,0	54,7	62,7	10,9	20,9	93,5	168,4	120,0	121,3	1401,9
1999	181,8	317,5	168,0	165,4	42,2	82,3	15,9	36,6	91,9	208,1	172,1	145,3	1627,1
2000	53,9	133,7	198,3	42,2	180,5	68,2	47,9	26,1	147,0	89,9	98,6	53,8	1140,1
2001	16,5	67,70	102,9	41,3	106,4	0,4	9,4	11,3	108,3	102,4	105,7	135,6	807,9
2002	18,6	76,4	173,4	257,0	106,7	82,9	31,3	17,8	50,6	207,2	66,4	151,5	1239,8
2003	16,0	102,4	135,6	168,0	10,3	20,9	15,2	55,9	90,3	156,8	177,1	114,6	1063,0
Medios	82,0	124,5	147,7	115,3	112,7	59,1	32,6	55,9	90,3	156,8	177,1	114,6	1275,3
Máximos	189,0	317,5	256,9	257,0	214,3	178,4	83,0	273,2	160,1	280,6	378,5	190,2	1834,7
Mínimos	1,2	32,3	37,9	0,7	10,3	0,4	5,9	5,30	28,3	46,2	66,4	33,1	807,9

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Figura 47. *Precipitación periodo 1986-2003 Estación La Mesa.*



Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

De los anteriores datos y su respectiva gráfica se puede concluir que los meses de mayor precipitación son febrero y marzo y en el segundo semestre del año octubre y noviembre, por otra parte, los meses de menor precipitación son enero, junio julio, agosto y diciembre.

Sin embargo, en la Tabla 17 se presentan datos limnimétricos proporcionados por el IDEAM durante el año 2018 y primeros dos meses del año 2019, de la estación ubicada en la Inspección municipal de San Joaquín.

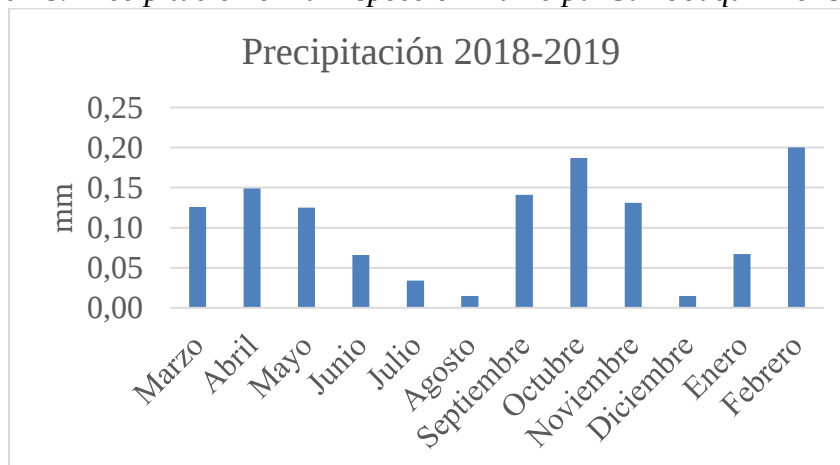
Tabla 17. Datos estación limnimétrica San Joaquín.

	Promedio Precipitación (mm)	Promedio Cota Nivel mínimo (m)	Promedio Cota Nivel máximo (m)	Cota promedio (m)
2018				
Marzo	0.13	0.65	0.69	0.67
Abril	0.15	0.80	0.88	0.84
Mayo	0.13	0.80	0.87	0.83
Junio	0.07	0.71	0.75	0.73
Julio	0.03	0.657	0.67	0.664
Agosto	0.02	0.60	0.62	0.61
Septiembre	0.14	0.61	0.64	0.63
Octubre	0.19	0.70	0.86	0.82
Noviembre	0.13	0.79	0.86	0.83
Diciembre	0.02	0.71	0.76	0.73
2019				
Enero	0.067	0.62	0.66	0.64
Febrero	0.2	0.64	0.70	0.66

Fuente: (IDEAM, 2019)

A partir de estos datos se generó la Figura 48, donde se puede concluir que se presentan dos épocas de muy baja precipitación, las cuales oscilan entre los meses de junio a agosto y en la segunda parte del año de diciembre a enero, considerándose épocas de verano las cuales pueden afectar la oferta hídrica de los cuerpos de agua de la zona objeto de estudio, siendo agosto y diciembre meses críticos.

Figura 48. Precipitación en la Inspección municipal San Joaquín 2018-2019.

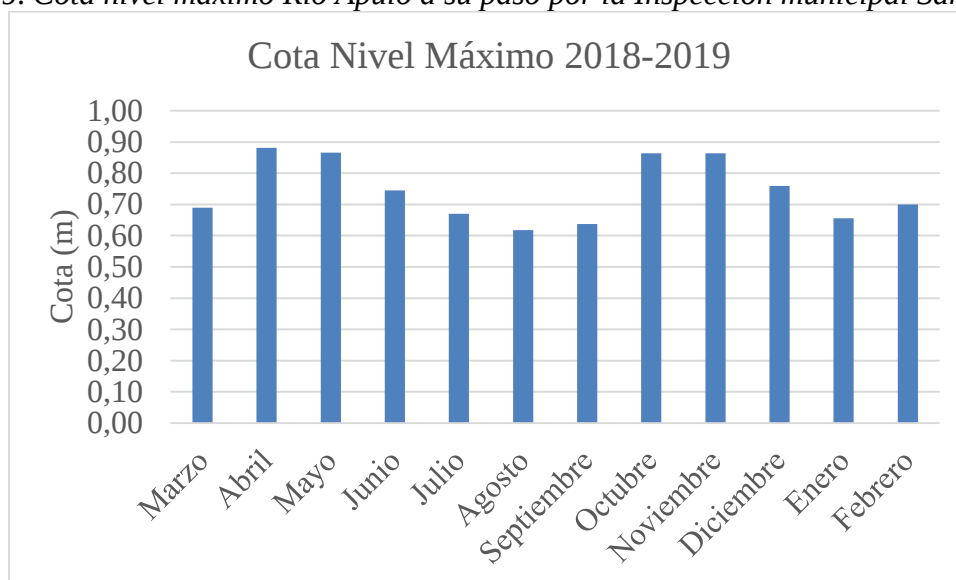


Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, entre los meses de febrero a abril y en la segunda parte del año en los meses de septiembre a noviembre se presenta temporada de invierno, proporcionando suficiente cantidad de agua como para mantener un caudal mínimo en los cuerpos de agua que desembocan en el Río Apulo.

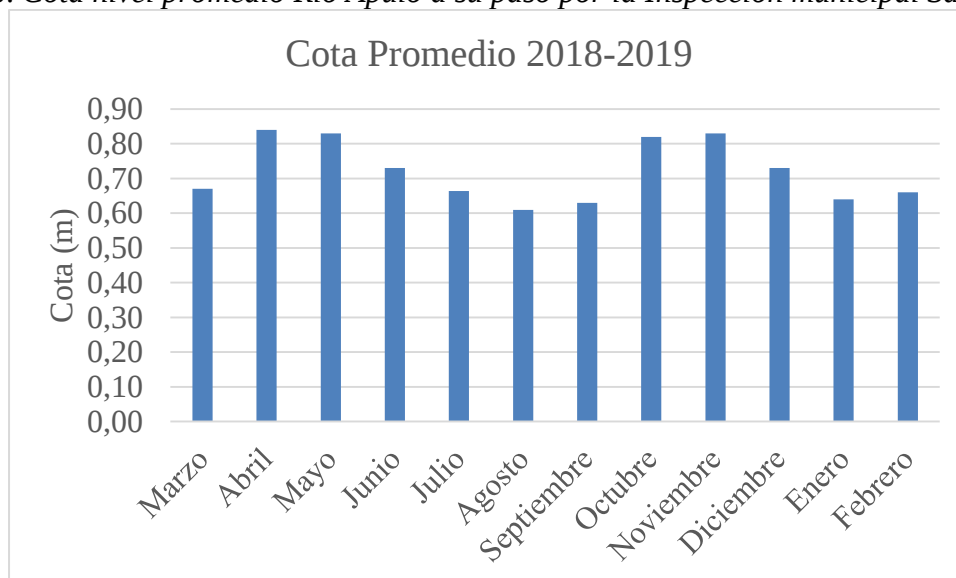
Los datos anteriores, proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, influyen en el nivel del Río Apulo, donde se presenta una cota máxima, promedio y mínima, del río a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín, evidenciados en las Figuras 49, 50 y 51 respectivamente.

Figura 49. Cota nivel máximo Río Apulo a su paso por la Inspección municipal San Joaquín.



Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Cota nivel promedio Río Apulo a su paso por la Inspección municipal San Joaquín.



Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Cota nivel mínimo Río Apulo a su paso por la Inspección municipal San Joaquín.



Fuente: Elaboración propia

Es de vital importancia tener en cuenta las cotas mínimas, para garantizar el paso de agua a través de la hidroturbina y por ende la generación de energía eléctrica, en este caso el nivel mínimo del agua del Río Apulo a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín es de 0.60 m presentada en el mes de agosto, catalogado como época de verano. En cuanto al nivel máximo, con un valor de 0.88 m, es ideal para el correcto funcionamiento del sistema de turbina a instalar.

10.1.1.5. Estudio de Caudales

La distribución temporal de los caudales es al igual que la de la precipitación, de tipo bimodal, presentando los valores máximos de los meses de marzo, abril y mayo en el primer semestre del año, siendo abril el mes con el mayor registro, con un valor de $1.05 \text{ m}^3/\text{s}$ y octubre, noviembre y diciembre en el segundo, con un registro máximo de $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de noviembre. El periodo de estiaje se observa solo a mediados del año y espacialmente en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, con un menor valor en el mes de agosto de $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$. En general, el segundo semestre del año presenta valores sensiblemente más altos que el primero. El valor promedio anual es de $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$. (Ecoforest & ecológica, 2003)

A continuación, en la Tabla 18 se presenta el área tributaria de la cuenca del Río Apulo y en la Tabla 19 los caudales con rango de tiempo 1999-2003 (m^3/s) suministrados por la estación limnimétrica San Javier, ubicada en el municipio de La Mesa, Cundinamarca, perteneciente a la CAR e instalada en el año 1988 y su respectiva grafica n la Figura 52.

Tabla 18. Área tributaria Río Apulo.

Código	Punto de control	Área (Km^2)
2120-02	Río Apulo	485,1

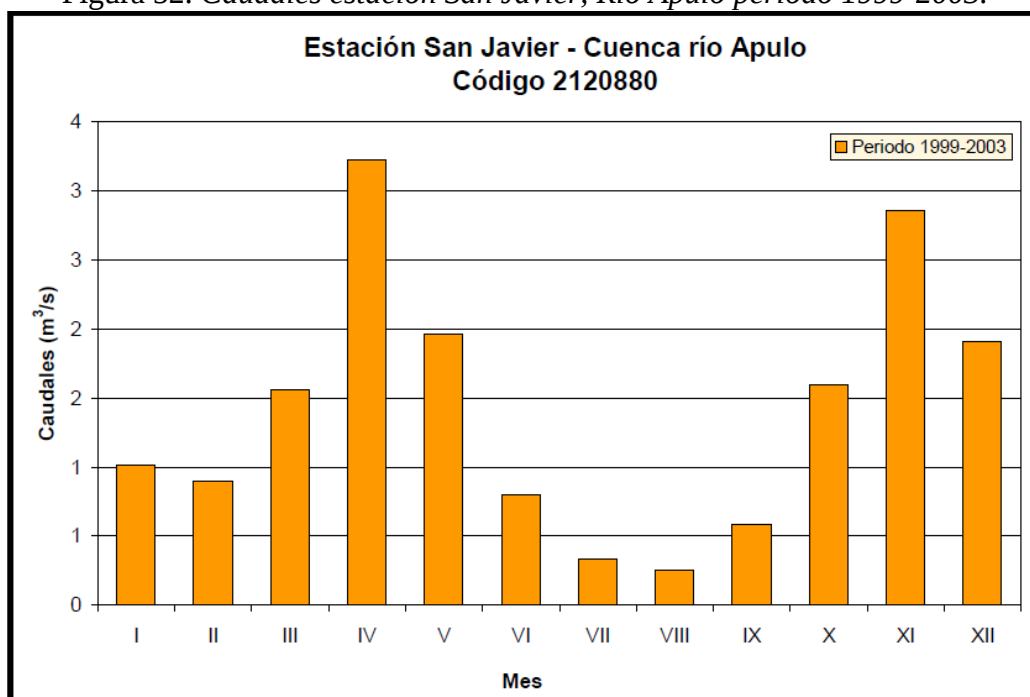
Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Tabla 19. Valores medios mensuales de caudales Río Apulo (m^3/s).

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Valor anual
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1999	0,7	1,2	1,2	1,3	0,9	0,8	0,2	0,2	0,5	3,1	7,3	4,3	1,8
2000	3,0	1,8	1,1	1,2	1,3	1,0	0,7	0,5	0,8	1,2	2,1	1,0	1,3
2001	0,5	0,4	1,4	0,7	0,6	0,4	0,2	0,2	0,3	1,0	0,9	1,5	0,7
2002	0,6	0,3	1,0	7,2	5,1	1,0	0,2	0,1	0,7	1,0	1,2	0,8	1,6
2003	0,3	0,8	3,1	5,7	1,98	0,80	0,33	0,25	0,58	1,58	2,88	1,90	1,35
Medios	1,0	0,9	1,6	3,2	2,0	0,8	0,3	0,2	0,6	1,6	2,9	1,9	1,3
Máximos	3,0	1,8	3,1	7,2	5,1	1,0	0,7	0,5	0,8	3,1	7,3	4,3	1,8
Mínimos	0,3	0,3	1,0	0,7	0,6	0,4	0,2	0,1	0,3	1,0	0,9	0,8	0,7

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Figura 52. Caudales estación San Javier, Río Apulo periodo 1999-2003.



Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

En las Tablas 20 y 21 se presentan datos para periodo de retorno de 100 años con los caudales mínimos y máximos generados en el Río Apulo.

Tabla 20. Caudales mínimos generados Río Apulo (m^3/s)

Periodo de retorno (años)	2	5	10	20	50	100
Río Apulo	0,426	0,241	0,180	0,144	0,114	0,101

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Tabla 21. Caudales máximos generados Río Apulo (m^3/s)

Periodo de retorno (años)	2	5	10	20	50	100
Río Apulo	11,3	14,1	15,7	17,0	18,5	19,6

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

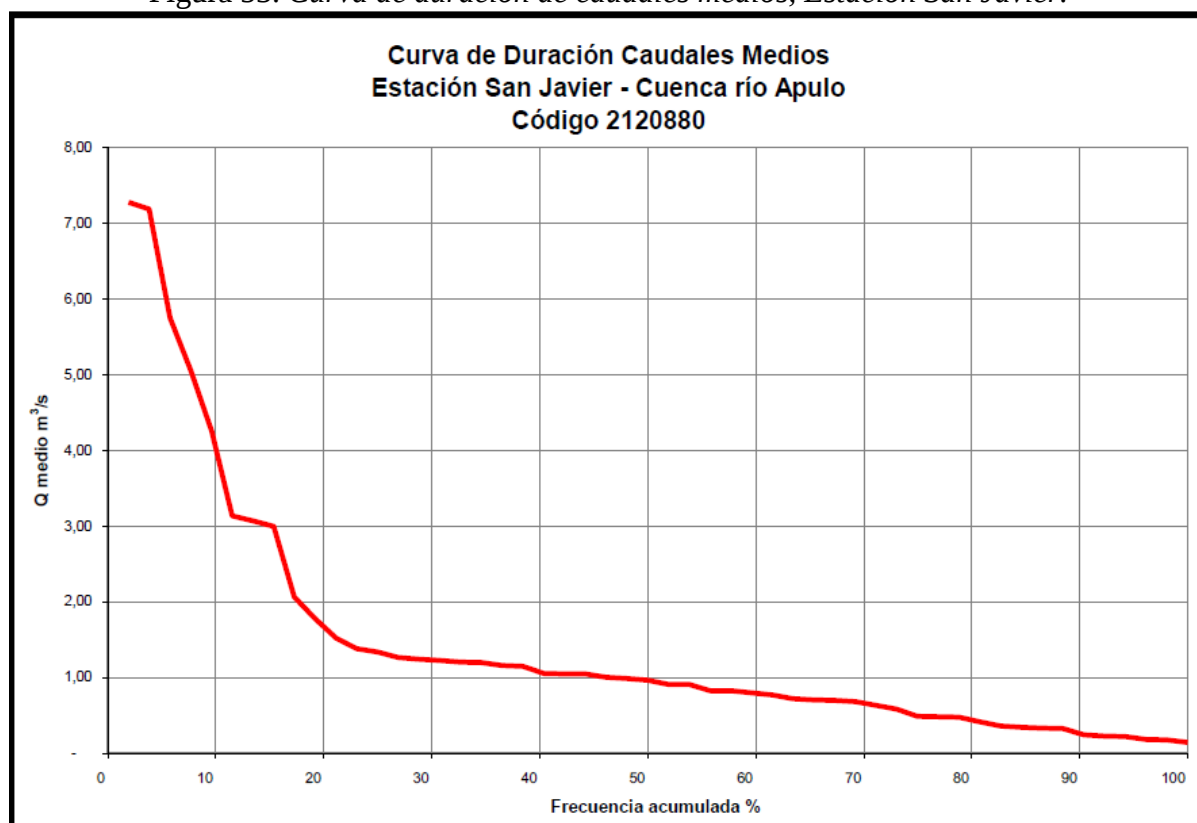
En la Tabla 22 se presentan los valores característicos de los caudales medios generados en el Río Apulo, en la estación limnimétrica de San Javier, en el periodo de tiempo 1999-2003 y en la Figura 53 su respectiva gráfica.

Tabla 22. *Valores característicos caudales medios, estación San Javier -La Mesa Cundinamarca*
(m^3/s)

Parámetro	San Javier (La Mesa, Cundinamarca)
Máximo registro	7,27
Registro 50%	0,96
Registro 75%	0,48
Registro 95%	0,22
Menor registro	0,14

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Figura 53. *Curva de duración de caudales medios, Estación San Javier.*

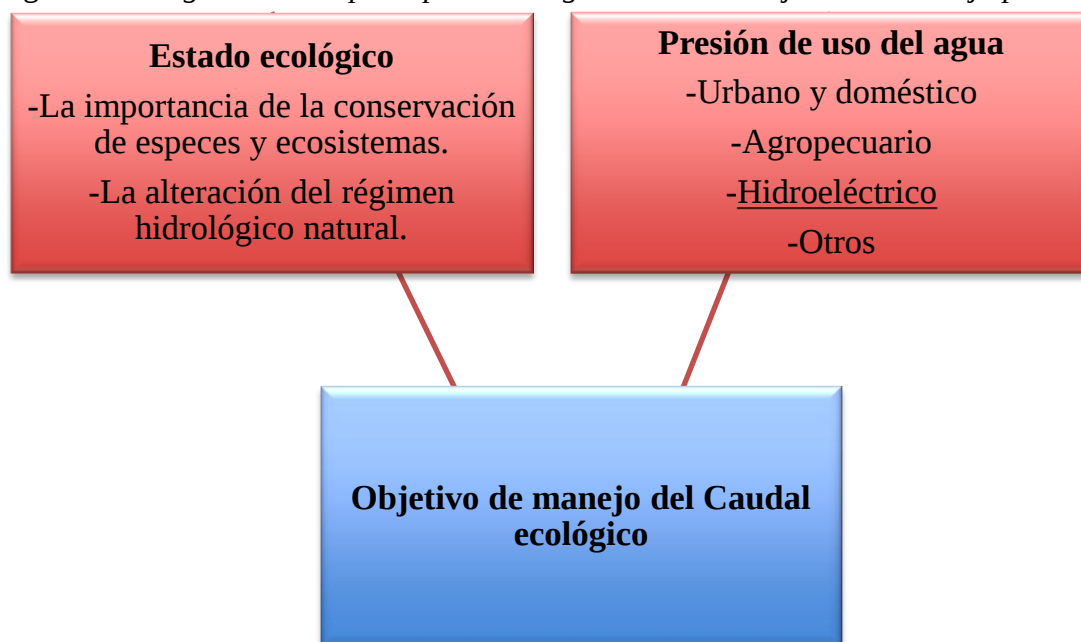


Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

En cuanto al caudal ecológico (CE), es de vital importancia ya que este es el que establece la cantidad del flujo de agua requerido para mantener ciertos componentes, funciones y procesos ecosistémicos los cuales proporcionan bienes y servicios a las comunidades.

Para conciliar las demandas ambientales y socio-económicas por el agua, la determinación de CE se basa en la definición de objetivos de manejo para cada tramo de río, subcuenca o cuenca, dependiendo de su estado ecológico y del grado de presión de uso, (Fondo Mundial para la Naturaleza WWF, 2010) presentado en la Figura 54.

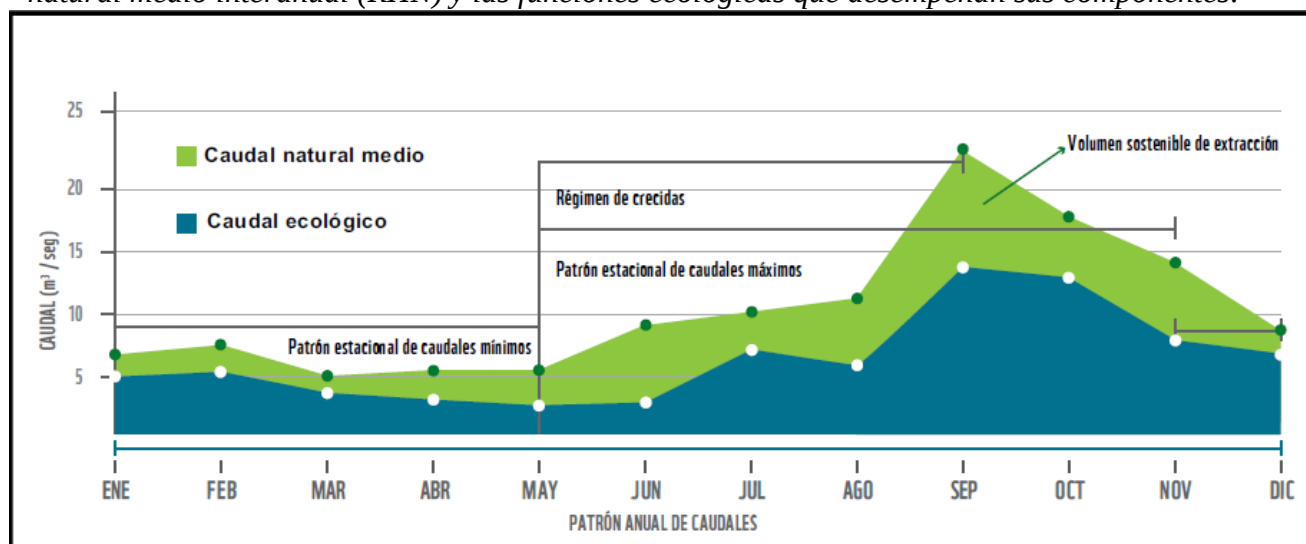
Figura 54. Diagrama conceptual para la asignación de un objetivo de manejo para un CE.



Fuente: (Fondo Mundial para la Naturaleza WWF, 2010)

A partir de estos elementos, un CE se define por un régimen hidrológico para mantener procesos ecológicos (reproducción, migración, alimentación, sucesión de especies, etc.), la conectividad en toda la cuenca y el balance hidrológico a largo plazo, de lo que depende la disponibilidad de agua para todos (Fondo Mundial para la Naturaleza WWF, 2010), como se puede observar en la Figura 55.

Figura 55. Régimen de caudal ecológico para un objetivo de manejo dado a partir del caudal natural medio interanual (RHN) y las funciones ecológicas que desempeñan sus componentes.



Fuente: (Fondo Mundial para la Naturaleza WWF, 2010)

De la Figura anterior, se logra tener mayor claridad de la actuación de un caudal ecológico en los diferentes procesos ecosistémicos, teniendo en cuenta su margen con respecto al patrón estacional de caudales mínimos y máximos, por ende, este CE brinda cierta confiabilidad en cuanto a la oferta del recurso hídrico en determinados momentos del año.

En la Tabla 23 se presenta el caudal ecológico del Río Apulo para el periodo de 1999-2003 según el estudio *Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá, subcuenca Río Apulo*, realizado por Ecoforest Ltda. y Planeación ecológica Ltda. para la CAR.

Tabla 23. Caudal ecológico Río Apulo

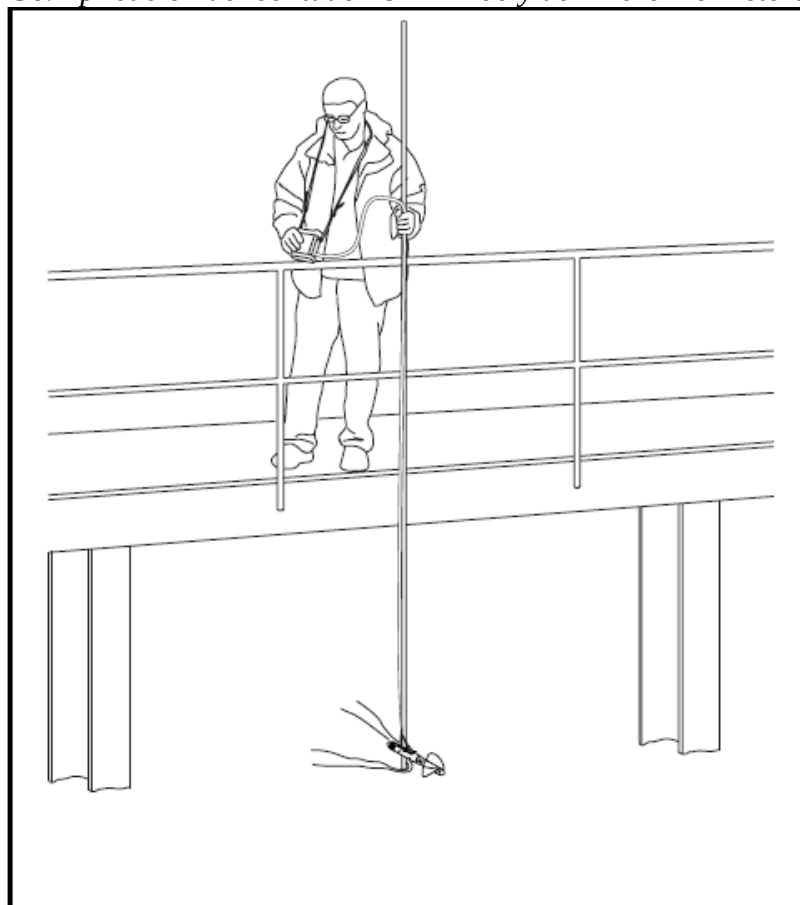
Código	Cuenca	Caudal (m ³ /s)
2120-02	Río Apulo	0,16

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Aun cuando la CAR no ha regulado los caudales ecológicos, CORTOLIMA mediante la Resolución 895 de 1999, establece que el caudal mínimo ecológico de una corriente corresponde al 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio (CORTOLIMA, 2010) lo que significa que el caudal ecológico para la subcuenca del Río Apulo sería 0,33 m³/s.

Por otra parte, en campo se realizó la medición de la velocidad de flujo mediante el contador OTT Z400, en la Figura 56 se puede observar un esquema de la forma de medición del parámetro anteriormente mencionado en campo.

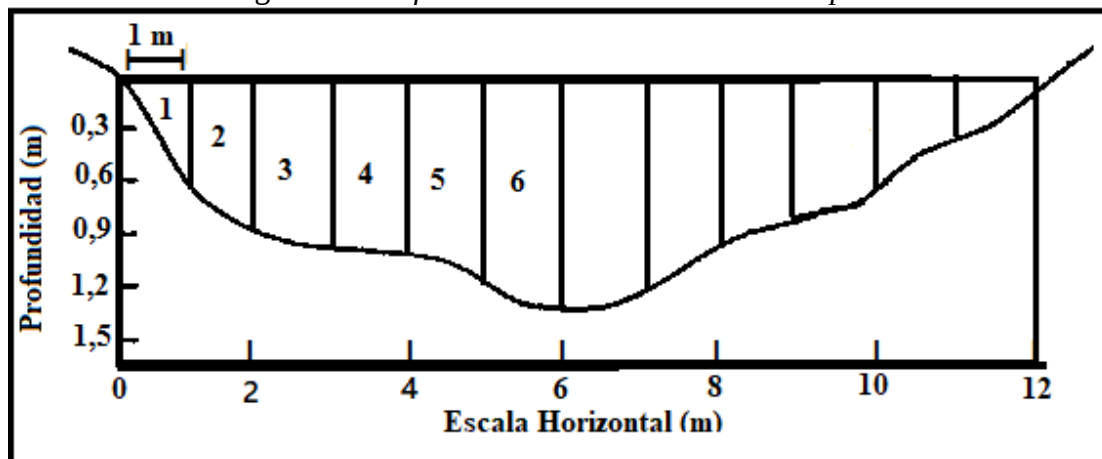
Figura 56. Aplicación del contador OTT Z400 y del micro molinete OTT C2.



Fuente: Manual de instrucciones contador OTT Z400

A partir de esta medición, realizada en 6 secciones como se presenta en la Figura 57, mediante una ecuación propia para el respectivo micro molinete de correlación lineal, se obtenga el valor del respectivo caudal, por otra parte se realizaron las mediciones del Río Apulo como ancho y profundidad en el mes de noviembre de 2018, en los puntos seleccionados con las coordenadas 4°38'32.8"N 74°31'9.1"W y la toma de datos de velocidad de flujo con el contador OTT Z400. Estos datos se presentan en la Tabla 24.

Figura 57. Perfil de toma de medidas del Río Apulo.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Mediciones en campo Río Apulo.

			Y=(0,053*N)+0,097				Q=Velocidad*Área	
Sección	Profundidad (m)	Ancho cauce (m)	Y=Velocidad de flujo (m/s)	N	Constante 1	Constante 2	Área (m²)	Caudal medio (m³/s)
1	0,32	1	0,39	5,5	0,053	0,097	0,32	0,12
2	0,55	1	0,53	8,26	0,053	0,097	0,55	0,29
3	0,80	1	1,41	24,74	0,053	0,097	0,49	0,69
4	1,20	1	1,04	17,88	0,053	0,097	0,28	0,29
5	0,49	1	1,29	22,52	0,053	0,097	0,8	1,03
6	0,28	1	1,27	22,14	0,053	0,097	1,2	1,52
Total								3,96

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Resolución 895 de 1999, se determinó el caudal ecológico como base para los posteriores cálculos, siendo el 25% del caudal medio:

$$3,96 \text{ m}^3/\text{s} * 0,25 = 0,99 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 3,96 \text{ m}^3/\text{s} - 0,99 \text{ m}^3/\text{s} = 2,97 \text{ m}^3/\text{s}$$

10.1.1.6. Oferta hídrica de la subcuenca Río Apulo (m³/s)

A partir del estudio de los caudales medios mensuales aportados por la subcuenca, se definió la oferta hídrica presentada en la Tabla 25, para dos escenarios del ciclo hidrológico los cuales son los meses secos y meses húmedos, con el fin de determinar posteriormente, contando con las demandas sobre la subcuenca, el balance oferta-demanda y el índice de escasez de la misma. (Ecoforest & ecológica, 2003)

El primero de los escenarios contemplado, y que se considera el crítico, es el periodo seco, definido como el promedio de los caudales de los meses que se encuentran por debajo del valor medio anual multianual y el segundo es el periodo húmedo, que incluye el promedio de los valores de los meses que están por encima de la media anual. (Ecoforest & ecológica, 2003)

Tabla 25. *Oferta hídrica Río Apulo.*

Código	Cuenca	Oferta (m ³ /s)	
		Periodo seco	Periodo húmedo
2120-02	Río Apulo	6,17	7,92

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

10.1.1.7. Demanda hídrica de la subcuenca Río Apulo (m³/s)

Por otra parte, se obtiene la demanda hídrica la cual es el consumo de agua en escenarios tanto urbano como rural según las diferentes actividades que realiza la población y el tamaño de esta, lo cual se puede detallar en la Tabla 26.

Tabla 26. *Demanda hídrica Río Apulo*

Piso Térmico	Tamaño Población	Consumo (l/hab/día)	
		Urbano	Rural
Fríos	<5,000	150	125
	5,001 a 10,000	165	125
	10,001 a 20,000	180	125
	>20,001	195	125
Templado	<5,000	165	135
	5,000 a 10,000	180	135
	10,001 a 20,000	190	135
	>20,001	200	135
Cálido	<5,000	190	140
	5,000 a 10,000	200	140
	10,001 a 20,000	210	140
	>20,001	220	140

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

Esta demanda hídrica de la cuenca del Río Apulo se divide en doméstica, agrícola e industrial, presentadas en las Tablas 27, 28 y 29 respectivamente.

- Demanda domestica

Tabla 27. *Demanda doméstica Río Apulo*

Cuenca	Análisis Demanda					
	Población (hab)			Demanda m ³ /s		
	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural	Total
Río Apulo	23.826	43.515	67.340	0,061	0,068	0,129

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

- Demanda agrícola

Tabla 28. *Demanda agrícola Río Apulo*

Cobertura actual	Total área (ha)	Área de riego (ha)	Modulo (l/s/ha)	Demanda (m ³ /s)
Caña panelera	1074,7	1074,7	0,10	0,11
Cultivos varios	1627,2	1627,2	0,10	0,16
Frutales	1760,3	1760,3	0,50	0,88
Pastos manejados	12144,6	1214,5	0,80	0,97
Plátano	27,2	27,2	0,50	0,01
Total	16634,0			2,14

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

- Demanda industrial

Tabla 29. *Demanda industrial Río Apulo.*

Código	Cuenca	Demanda (m ³ /s)
2120-02	Río Apulo	0,004

Fuente: (Ecoforest & ecológica, 2003)

10.1.1.8. Solidos totales, solidos disueltos y solidos suspendidos.

Por otra parte, se realizó prueba de solidos totales, solidos disueltos totales y solidos suspendidos totales a partir de una muestra de agua recolectada en campo como se puede observar en la Figura 58, ya que la presencia de carga sólida en el agua genera una mayor velocidad de flujo y por ende mayor caudal y generación de energía eléctrica.

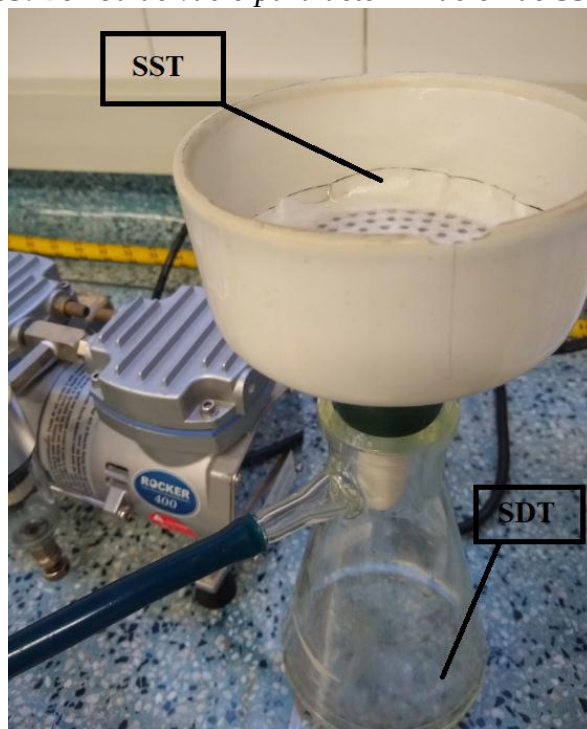
Figura 58. *Prueba de laboratorio.*



Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se hizo uso de la bomba de vacío como se observa en la Figura 59 para poder pasar el agua por el medio filtrante y así tener las muestras tanto para sólidos suspendidos totales los cuales quedaron retenidos en el filtro, y los sólidos disueltos totales que quedaron en el agua filtrada.

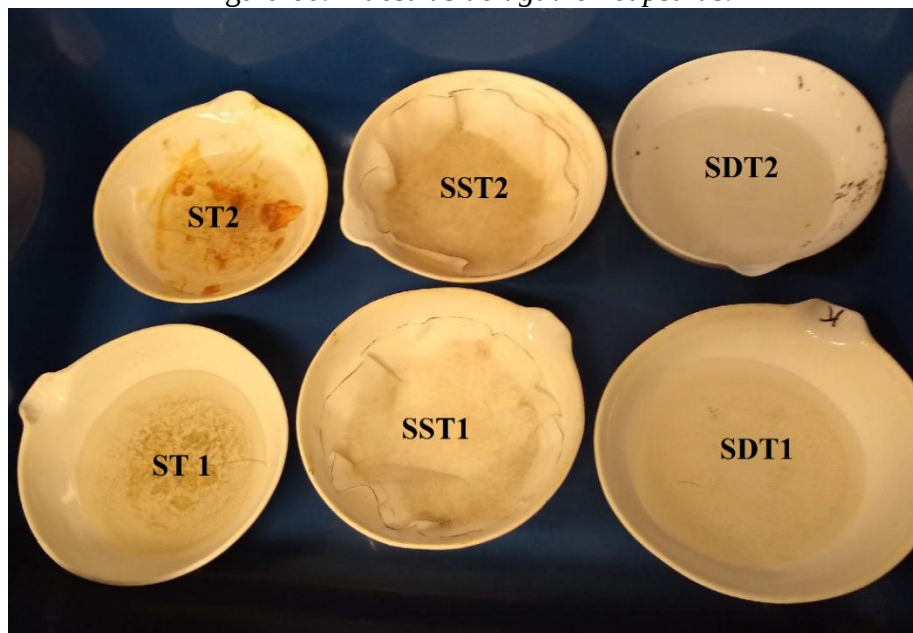
Figura 59. Bomba de vacío para determinación de SST y SDT.



Fuente: Elaboración propia

Las pruebas se hicieron por duplicado, por ende se obtuvieron 6 muestras como se observa en la Figura 60, las cuales posteriormente se ingresaron en la estufa a 105°C durante 24 horas.

Figura 60. Muestras de agua en capsulas.



Fuente: Elaboración propia

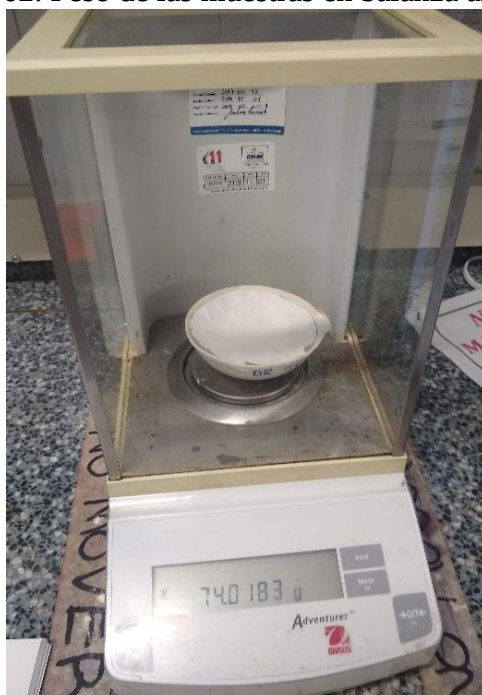
Por último, se retiraron las cápsulas de la estufa y se ingresaron en el desecador como se observa en la figura 61, para enfriarlas durante 15 minutos aproximadamente para posteriormente pesar cada una de estas en la balanza como se observa en la Figura 62.

Figura 61. Muestras en el desecador.



Fuente: Elaboración propia

Figura 62. Peso de las muestras en balanza analítica.



Fuente: Elaboración propia

Del procedimiento anterior de obtuvieron los siguientes resultados:

- **Solidos totales**

Ecuación 8. *Solidos totales.*

$$ST = \frac{\text{Peso 2} - \text{Peso 1}}{\text{Volumen de muestra}} = \text{mg/L}$$

Fuente: (Botello, 2019)

Peso de capsula 1 vacía (Peso 1): 74.7300 g

Peso de capsula 2 vacía (Peso 1): 68.0480 g

Volumen de la muestra: 100 ml

$$ST_1 = \frac{74,7598 \text{ g} - 74,7300 \text{ g}}{0,1 \text{ L}} = 0,298 \text{ mg/L}$$

$$ST_2 = \frac{68,0686 - 68,0480}{0,1 \text{ L}} = 0,206 \text{ mg/L}$$

Promedio: 0,252 mg/L

- Solidos suspendidos totales (SST)

Ecuación 9. *Solidos suspendidos totales.*

$$SST = \frac{\text{Peso 2} - \text{Peso 1}}{\text{Volumen de muestra}} = \text{mg/L}$$

Fuente: (Botello, 2019)

Peso de capsula 1 + Papel Filtro (Peso 1): 74,0209 g

Peso de capsula 2 vacía + Papel Filtro (Peso 1): 84,5816 g

Volumen de la muestra filtrada: 100 ml

$$SST_1 = \frac{74,0237 \text{ g} - 74,0209 \text{ g}}{0,1 \text{ L}} = 0,028 \text{ mg/L}$$

$$SST_2 = \frac{84,5831 \text{ g} - 84,5816 \text{ g}}{0,1 \text{ L}} = 0,015 \text{ mg/L}$$

Promedio: 0,0215 mg/L

- Sólidos disueltos totales (SDT)

Ecuación 10. *Sólidos disueltos totales.*

$$SDT = \frac{\text{Peso 2} - \text{Peso 1}}{\text{Volumen de muestra}} = \text{mg/L}$$

Fuente: (Botello, 2019)

Peso de capsula 1 vacía (Peso 1): 83,8761 g

Peso de capsula 2 vacía (Peso 1): 77,5279 g

Volumen de la muestra filtrada: 50 ml

$$SDT_1 = \frac{83,9044 \text{ g} - 83,8761 \text{ g}}{0,05 \text{ L}} = 0,566 \text{ mg/L}$$

$$SDT_2 = \frac{77,5566 \text{ g} - 77,5279 \text{ g}}{0,05 \text{ L}} = 0,574 \text{ mg/L}$$

Promedio: 0,57 mg/L

Esta prueba de sólidos puede determinar un aumento en la energía potencial relacionada con la Ecuación 11. Donde a mayor cantidad de sólidos presentes en el agua, la masa es mayor y por ende la energía potencial aumentaría considerablemente. Por otra parte, la limitante para aprovechar esta energía potencial depende del tipo de turbina.

Ecuación 11. Energía potencial.

$$e_p = m * g * h$$

Fuente: (Friedrich & Álvarez, s.f)

Donde:

m: masa

g: gravedad

h: altura o cambio de pendiente

10.2. Objetivo específico N° 2: Identificar la cantidad de energía que potencialmente puede proporcionar una turbina hidroeléctrica, en relación a la satisfacción de las necesidades de la Inspección municipal de San Joaquín.

En las tablas 30, 31, 32 y 33 se recopila la información del municipio de La Mesa, Cundinamarca según su ubicación, bien sea rural, urbana o centro poblado, proporcionada por la empresa Enel-Codensa, conteniendo el total de clientes de 2017 y 2018, así como la totalidad del consumo por año. No fue posible identificar la Inspección municipal de San Joaquín, ya que el código DANE solo está relacionado directamente con el municipio de La Mesa.

10.2.1. Consumo energético de la Inspección municipal - La Mesa, Cundinamarca.

Tabla 30. Cantidad de cuentas 2017 Enel-Codensa.

Departamento	Municipio	Ubicación	Cantidad De Cuentas
Cundinamarca	La Mesa	Centro poblado	840
		Rural	6.514
		Urbana	8.488

Fuente: (Enel Codensa, 2019)

Tabla 31. Consumo de energía kWh 2017 Enel-Codensa.

Año	Departamento	Municipio	Ubicación	Consumo De Energía Kwh
2017	Cundinamarca	La Mesa	Rural	8.278.766
			Urbana	14.968.228
			Centro Poblado	1.007.654

Fuente: (Enel Codensa, 2019)

Tabla 32. Cantidad de cuentas 2018 Enel-Codensa.

Departamento	Municipio	Ubicación	Cantidad De Cuentas
Cundinamarca	La Mesa	Urbana	8.673
		Rural	6.902
		Centro Poblado	843

Fuente: (Enel Codensa, 2019)

Tabla 33. Consumo de energía kWh 2018 Enel-Codensa.

Año	Departamento	Municipio	Ubicación	Consumo De Energía Kwh
2018	Cundinamarca	La Mesa	Rural	11.131.304
			Centro Poblado	1.094.625
			Urbana	13.626.312

Fuente: (Enel Codensa, 2019)

Partiendo de estos datos se procedió a realizar la elección del tipo de turbina y posterior cálculo del rendimiento y cobertura energética poblacional del sistema hidroeléctrico.

Inicialmente se tuvieron en cuenta los datos de consumo energético del año 2018 del casco urbano del municipio de La mesa el cual fue de 13.626.312 kWh. Usando los datos poblacionales ya mencionados en el apartado del marco biogeográfico - descripción social, se procedió a realizar el respectivo cálculo para determinar el consumo energético de la población perteneciente al casco urbano de la Inspección municipal de San Joaquín.

$$1.284 \text{ hab} \left(\frac{13.626.312 \text{ KWH}}{26.194 \text{ hab}} \right) = 667.946 \text{ kWh}$$

10.2.2. Selección de la turbina a implementar.

Turbulent propone 3 tipos de turbinas, como se observa en la Tabla 34, las cuales contienen diferentes características para su funcionamiento y rendimiento, debido a que el caudal medio medido fue de 3,96 m³/s, se escogió el modelo C.

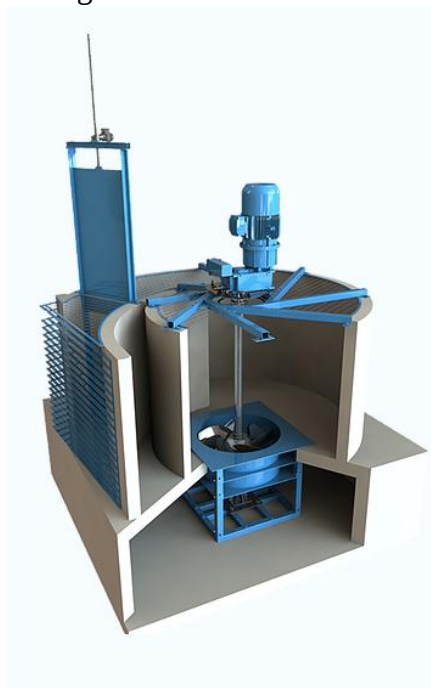
Tabla 34. Modelos de turbinas propuesto por Turbulent.

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Diámetro máximo de la cuenca (m)	3.92	5.3	6.91
Diámetro mínimo de la cuenca (m)	3.32	4.51	5.84
Altura de la cuenca (m)	Hasta 4	Hasta 3.5	Hasta 3
Unidad básica de peso (Kg)	940	1330	1880
Dimensión de la unidad central ancho x alto x largo (m)	2,63 x 5,96 x 2,64	3,53 x 5,86 x 3,54	4,70 x 6,38 x 4,71
Rango de la cabeza (m)	1.55-4	1.55-3.0	1.8-3.3
Rango de flujo (m³/s)	1.2-3.0	1.6-3.6	2.0-5.8
Rango de potencia (KW)	10-55	12-55	16-100

Fuente: (TURBULENT, 2018)

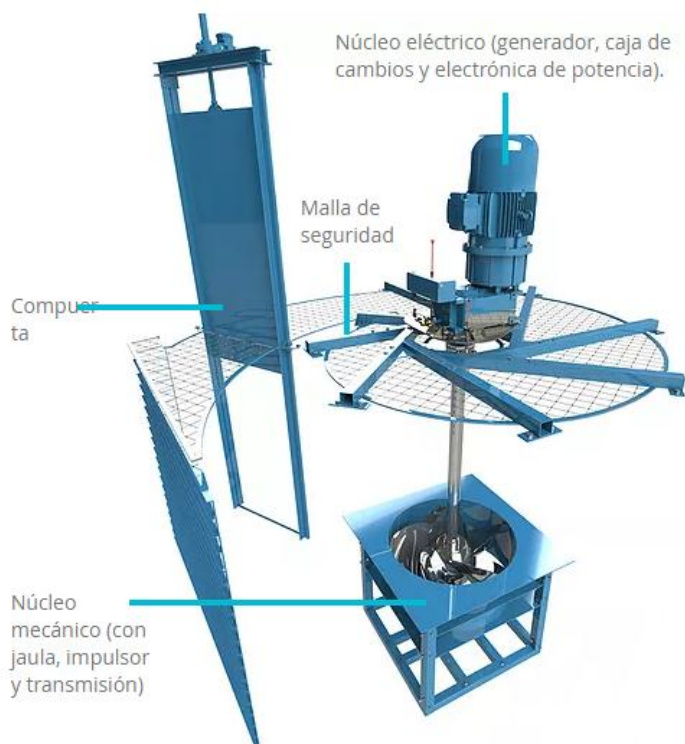
Estos modelos anteriormente observados, varían según las condiciones requeridas, sin embargo, Turbulent maneja una sola unidad principal de turbina denominada *Turbina Vortex* la cual se puede observar en la Figura 63 y 64 con sus respectivos componentes y en la Figura 65 las especificaciones de dichos componentes.

Figura 63. *Turbina Vortex*.



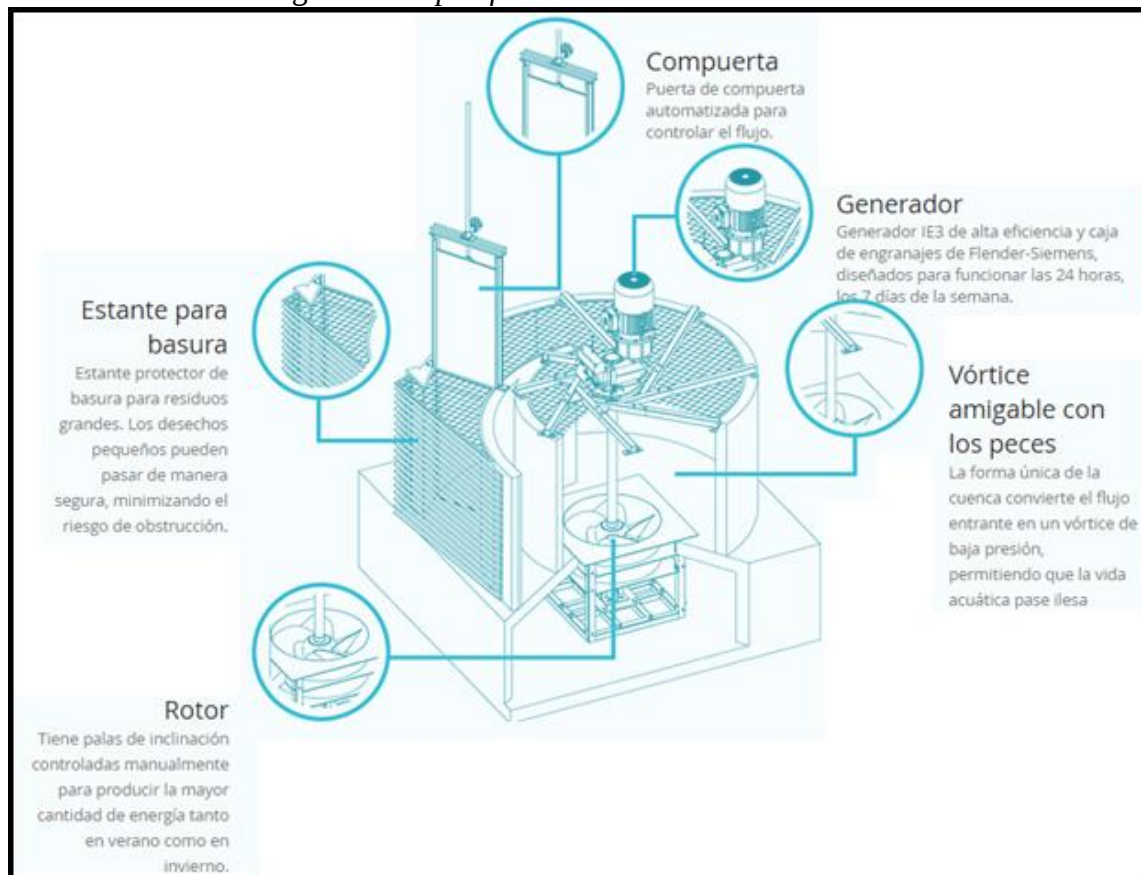
Fuente: (TURBULENT, 2018)

Figura 64. *Esquema de la Turbina Vortex*.



Fuente: (TURBULENT, 2018)

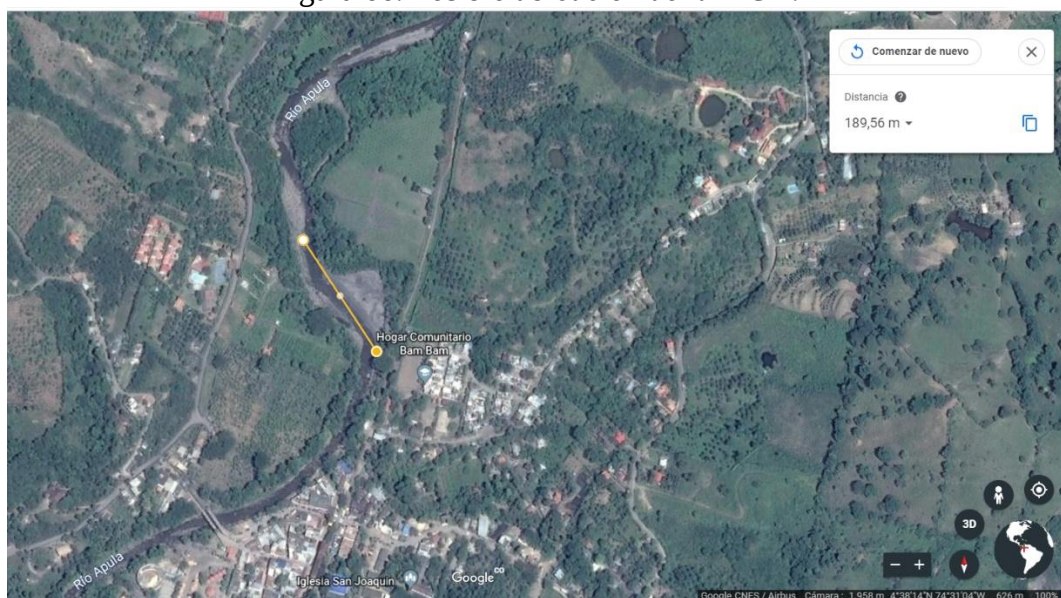
Figura 65. Especificaciones de la Turbina Vortex



Fuente: (TURBULENT, 2018)

Una vez determinado el tipo de turbina a utilizar en el desarrollo del presente proyecto, se procedió a verificar la posible ubicación de la MCH como se observa en la Figura 66 con una distancia de 189,56 m aproximadamente.

Figura 66. Posible ubicación de la MCH.



Fuente: (Google Earth, 2019)

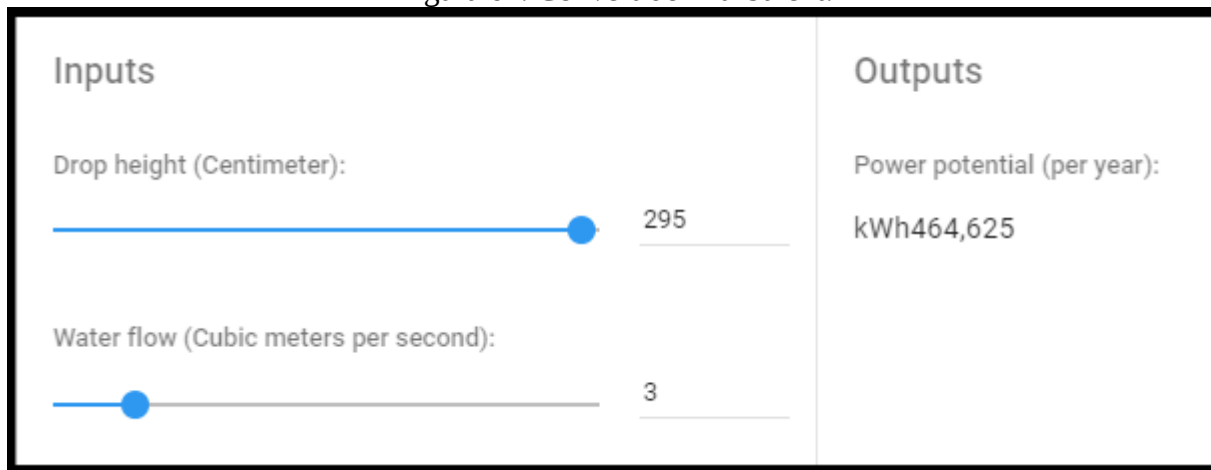
Partiendo de este dato se puede determinar la pendiente en este tramo del terreno teniendo en cuenta que el cambio de cota en la topografía del terreno es cada 20 metros.

$$189,56 \text{ m} \left(\frac{20 \text{ m}}{1,285 \text{ m}} \right) = 2,95\%$$

10.2.3. Capacidad de generación de energía eléctrica de la Turbina Vortex respecto a las condiciones de la Inspección municipal de San Joaquín.

Posteriormente, teniendo en cuenta que el caudal medio medido menos el caudal ecológico fue de $2,97 \text{ m}^3/\text{s}$ y la pendiente de 2,95%, se ingresaron estos valores al convertidor de Turbulent para estimar el potencial energético que puede proporcionar el Río Apulo como se evidencia en la Figura 67.

Figura 67. Convertidor Turbulent.



Fuente: (TURBULENT, 2018)

Según el convertidor energético de Turbulent, partiendo del caudal y de la altura de caída del agua, la capacidad de generación de la turbina es de 619,500 kWh/año, lo que en kWh sería:

$$464,625 \frac{\text{KWH}}{\text{año}} \left(\frac{1 \text{ año}}{365 \text{ dias}} \right) = \left(\frac{1,272.945 \text{ dias}}{24 \text{ horas}} \right) = 53,04 \text{ kWh}$$

Teniendo en cuenta que el 100% de consumo energético del casco urbano de la Inspección municipal de San Joaquín es de 667.946 kWh/año , la turbina satisfecerá aproximadamente el **70%** del servicio eléctrico de dicha la población, lo cual afirma la eficiencia del sistema hidroeléctrico propuesto.

$$464,625 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \left(\frac{100\%}{667,946 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}} \right) = 69,56\% \approx 70\%$$

De 360 viviendas las cuales se encuentran en el casco urbano de la Inspección municipal, aproximadamente 252 se verían beneficiadas con la generación y distribución de energía hidroeléctrica proveniente del Río Apulo mediante la turbina Vortex

10.3 Objetivo específico 3: Evaluar la viabilidad económica, social y ambiental para la implementación de un modelo de turbina hidroeléctrica como generador energético.

10.3.1. Matriz de impactos sociales, económicos y ambientales.

Inicialmente se realizó una matriz de identificación de impactos para los diferentes componentes que abarca el desarrollo del presente proyecto, en cuanto al diseño, instalación y mantenimiento de la micro central hidroeléctrica, como se observa en la Tabla 35, obteniendo una calificación cualitativa dada de manera perceptiva como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 35. Matriz de impactos en las dimensiones social, biótica y abiótica.

Dimensión	Componente	Elemento afectado	Aspecto	Calificación cualitativa
Abiótico	Agua	Calidad del agua	ST, SST, SDT	
		Cuerpo de agua	Sin cambio del cauce	
	Aire	Gases	Disminución de GEI	
		Partículas	N/A	
Biótico	Flora	Cobertura vegetal	N/A	
		Diversidad y numero	N/A	
	Fauna	Hábitat y nichos ecológicos	Alteración ecosistema a pequeña escala	
		Diversidad y número	Vórtice amigable con los peces	
	Paisaje	Cambio del paisaje	Alteración física del medio	
Social	Demográfico	Calidad de vida	Servicio de energía eléctrica	
	Económico	Generación de empleo	Construcción y mantenimiento de la MCH	
		Valoración de bienes	Comunidad con infraestructura moderna	
		Desarrollo municipal	Implementación de energías limpias	
		Costo de servicio eléctrico	Ahorro en el servicio	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Convenciones matriz de impactos en las dimensiones social, biótica y abiótica.

Convención	Rango
Impacto positivo	
Impacto nulo	
Impacto negativo	

Fuente: Elaboración propia

Con base en la matriz anterior se presentaron a detalle la viabilidad económica, social y ambiental del proyecto en los siguientes apartados.

10.3.2. Dimensión económica

10.3.2.1. Costos de inversión y retorno de inversión

A continuación, en las Tablas 37 y 38 se presentan las tarifas de energía eléctrica para el sector residencial y no residencial según la empresa Enel-Codensa, siendo CS el Consumo de subsistencia.

Tabla 37. Tarifas de energía eléctrica Sector residencial.

Sector residencial nivel de tensión 1				
Estrato	Rango de consumo (KWh-mes)	Propiedad de Codensa (\$/kWh)	Propiedad del cliente (\$/kWh)	Propiedad compartida (\$/kWh)
1	0-CS (+) Mas de CS	204,3363	189,1798	196,7581
		479,3389	443,5480	461,4435
2	0-CS (+) Mas de CS	255,4206	236,4749	245,9475
		479,3389	443,5480	461,4435
3	0-CS (+) Mas de CS	407,4381	377,0158	392,2270
		479,3389	443,5480	461,4435
4	Todo consumo	479,3389	443,5480	461,4435
5	Todo consumo	575,2067	532,2576	553,7322
6	Todo consumo	575,2067	532,2576	553,7322
Promedio		437.2182	404.5975	420.9079
Total promedio				420,9079

Fuente: (Enel-Codensa, 2018)

Tabla 38. Tarifas de energía eléctrica Sector no residencial.

Sector no residencial			
	Nivel 1 Propiedad de Codensa (\$/kWh)	Nivel 1 Propiedad del cliente (\$/kWh)	Nivel 1 Propiedad compartida (\$/kWh)
Oficial e industrial sin contribución	479,3389	443,5480	461,4465
	483,3909	447,6000	465,4435
	478,3370	442,5461	460,4416
Industrial y comercial con contribución	575,2067	532,2576	553,7322
	580,0691	537,1200	558,5946
	574,0044	531,0553	552,5299

Sector no residencial			
	Nivel 1 Propiedad de Codensa (\$/kWh)	Nivel 1 Propiedad del cliente (\$/kWh)	Nivel 1 Propiedad compartida (\$/kWh)
Industrial sin contribución	483,8402	448,0493	465,9448
	478,1557	442,3648	460,2603
Industrial con contribución	580,6082	537,6592	559,1338
	573,7868	530,8378	552,3124
Promedio	528,674	489,3038	508,9840
Total promedio			508,9872

Fuente: (Enel-Codensa, 2018)

El total del promedio entre las tarifas de energía eléctrica del sector residencial y no residencial para el año 2018 fue de **\$464.9476 kWh**, teniendo en cuenta el potencial energético del río el cual fue de 464,625 kWh/año, se procedió a calcular el precio del kWh al consumidor el cual sería de:

$$\$464,9476 \text{ kWh} \times 464,625 \text{ kWh} = \$216'026.279 \text{ kWh/año}$$

Turbulent maneja un precio de generación eléctrica de €2.500 por KW, lo cual en pesos colombianos equivale a \$8'775.356. En este caso la turbina tiene una capacidad de generar 53,04 kWh lo que quiere decir que:

$$53,04 \text{ kWh} \times \$8.852.401 = \$469'531.349 \text{ kWh}$$

Las turbinas de Turbulent son la opción más rentable disponible para producir energía hidroeléctrica. Los costos generales de instalación para un sistema completo, incluidas las obras civiles, se estiman entre 2500-4000 euros/ kW, lo que en pesos colombianos sería entre \$8'852.401 - \$14'163.842. Su calidad, sus materiales resistentes y su diseño innovador lo convierten en una fuente duradera de energía, ecológica y respetuosa con los peces, con un mantenimiento muy bajo. (TURBULENT, 2018)

El costo de inversión, teniendo en cuenta un promedio de los costos de instalación del sistema, incluidas las obras civiles con un valor de \$11'508.121 y el costo de generación de energía eléctrica de \$469'531.349 kWh para producir 464,625 kWh al año, es de \$481'039.470, el cual, teniendo en cuenta el precio al consumidor anual, siendo este mensualmente de \$12'002.189 se recuperaría aproximadamente en 2 años y 3 meses, lo que hace realmente rentable este sistema de generación eléctrica a largo plazo. En la Tabla 39 podemos ver que para el segundo año se tendría una recuperación de \$432'052.558, y para el tercer año se necesitaría tan solo de casi un trimestre para empezar a obtener las ganancias de la MCH implementada.

Tabla 39. Tiempo de recuperación del costo de inversión.

Año	Costo de inversión	Retorno de inversión: Precio al consumidor/año	
1	\$481'039.470	\$216'026.279	\$216'026.279
2		\$216'026.279	\$432'052.558
3		\$48'986.912	\$481'039.470
4	Ganancias	\$167'039.367	\$648'078.837
		\$216'026.279	\$864'105.116

Fuente: Elaboración propia

La micro planta hidroeléctrica propuesta es inteligente y de cabeza baja, la cual se puede instalar

en ubicaciones con una diferencia de altura de tan solo 1,5 metros a 3 metros, con una turbina Vortex que puede suministrar de 15 kW a 100 kW, según las especificaciones que presente el terreno y cuerpo de agua. (TURBULENT, 2018)

10.3.2.2. Mantenimiento de la turbina

Se estima que la vida útil de un sistema completo es de 30 años, siempre que se siga con el plan de mantenimiento mínimo recomendado por Turbulent el cual se presenta en la Figura 68.

Figura 68. *Mantenimiento mínimo de la turbina Vortex.*



Fuente: (TURBULENT, 2018)

10.3.3. Dimensión social y ecológica

En primer lugar, en cuanto a la dimensión ecológica, principalmente el proyecto contribuye a la disminución de gases efecto invernadero (GEI) debido a la fomentación de energías limpias y renovables, dejando de lado las energías fósiles o convencionales, logrando de este modo alcanzar el objetivo del Acuerdo de París como se puede observar en la Figura 69, el cual consiste en limitar la temperatura media global para evitar los peores impactos del cambio climático, como tormentas y sequías todavía más graves. (United Nations Climate Change, 2018)

La evolución de la energía solar y eólica ha sido la fuerza motriz de la transición hacia un mundo de bajas emisiones de CO₂ en los últimos años. Sin embargo, a pesar de la aparición de nuevas fuentes de energía, una tecnología que sigue siendo la piedra angular de la combinación de energías renovables en algunas regiones de la tierra es: la energía hidroeléctrica. (United Nations Climate Change, 2018)

La energía hidroeléctrica mantiene una doble relación con el cambio climático. Por un lado, contribuye a evitar las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la quema de combustibles fósiles y por otro, es probable que la disponibilidad de agua para la generación de energía se vea afectada por el cambio en los patrones de precipitaciones, que puede reducir el caudal de los ríos. (United Nations Climate Change, 2018)

Figura 69. *Acuerdo de París.*

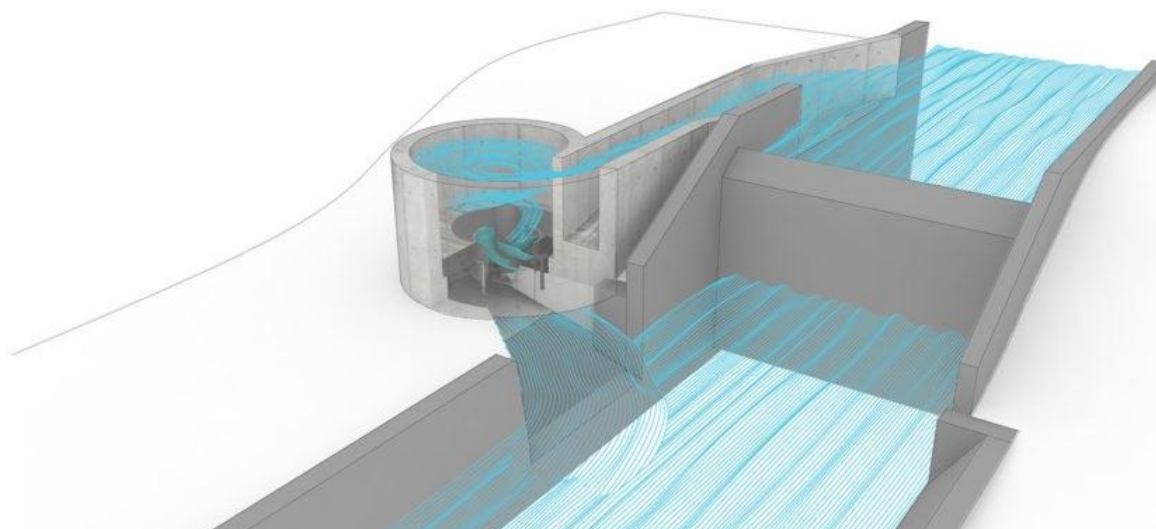


Fuente: (El Heraldo, 2016)

La contribución del sector hidroeléctrico a los objetivos del Acuerdo de París debe considerarse no solo en términos de evitar emisiones de gases de efecto invernadero, sino también como fomento de proyectos que garanticen la minimización de los efectos negativos derivados de grandes proyectos, como el presente estudio ya que evita algunas consecuencias medioambientales y sociales resultantes de las grandes centrales hidroeléctricas como la deforestación, el impacto en la vida acuática y el desplazamiento de grupos étnicos y comunidades vulnerables. (United Nations Climate Change, 2018)

Además de lo anterior, el sistema propuesto por Turbulent no altera ni desvía el cauce del río, el agua que ingresa al sistema de turbina Vortex, retoma su flujo natural metros más adelante como se observa en la Figura 70, cuando ya se ha aprovechado su velocidad de flujo para generar energía eléctrica, lo cual le genera un plus enorme, frente a otras fuentes de energía.

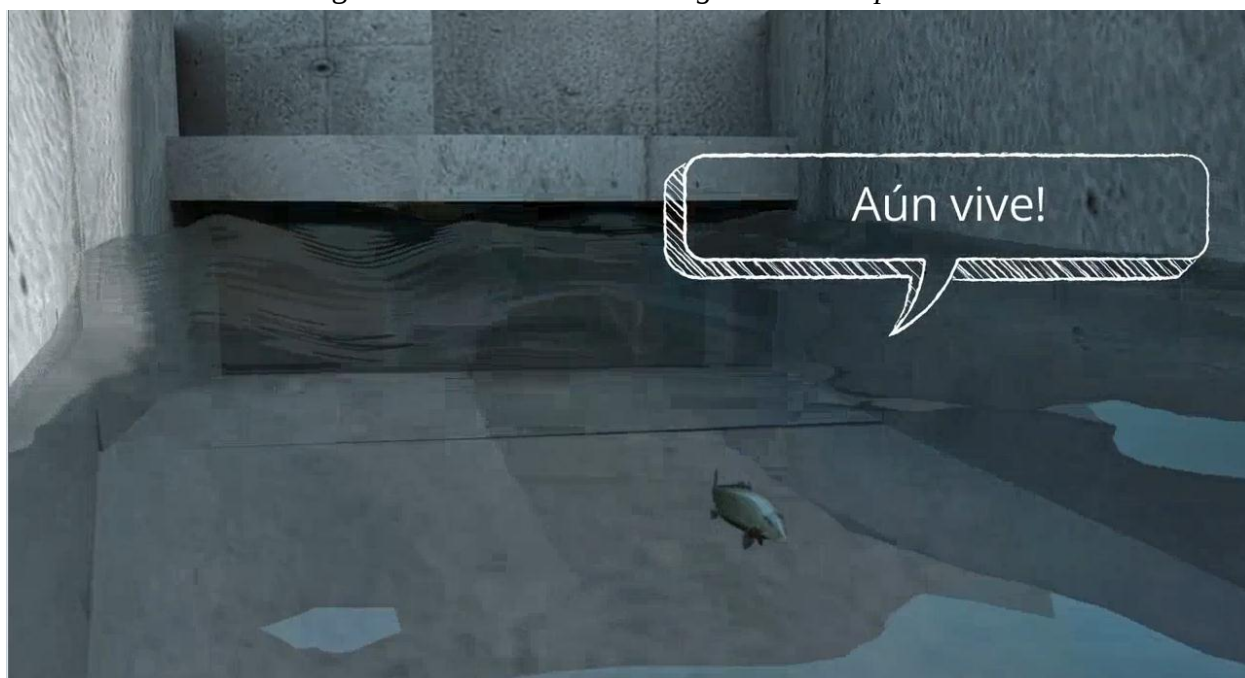
Figura 70. Simulación del retorno del agua al cauce natural del cuerpo de agua.



Fuente: (inhabitat, 2018)

Otra de las ventajas de este sistema hidroeléctrico, específicamente de la turbina Vortex, es que es amigable con los peces como se observa en la Figura 71 ya que estos pueden nadar libremente, tanto en la cuenca, como en la turbina, donde sólo queda un vórtice de agua constante, sin ningún tipo de obstrucción en el canal. (Mannise, 2018)

Figura 71. Turbina Vortex amigable con los peces.



Fuente: (TURBULENT, 2018)

Por otra parte, para la dimensión social, se genera una viabilidad muy amplia debido a las consecuencias que genera el desarrollo de este tipo de proyectos, como se presentó en la matriz

de impactos, cabe resaltar que la calidad de vida de los habitantes de la Inspección municipal de San Joaquín mejoraría, a partir del porcentaje de energía eléctrica que se genera mediante la turbina Vortex, principalmente en el desarrollo de las actividades comerciales y agrícolas las cuales son su base económica.

Existen diversas razones como se observa en la Figura 72, por las cuales resulta benéfico la implementación de una MCH, como la generación de empleo, en este caso para las labores de construcción y mantenimiento del sistema de turbina, aumento de la calidad de vida y un futuro ahorro en la prestación del servicio de energía eléctrica.

Figura 72. Beneficios de una MCH.



Fuente: (PIVingeniería, 2018)

Por último, en la Figura 73 se presenta a manera de síntesis la viabilidad económica, social y ecológica del proyecto, donde se puede apreciar que abarca todas las dimensiones establecidas y

presenta un modelo óptimo de generación de energía eléctrica a partir de una energía limpia y renovable.

Figura 73. Viabilidad social, económica y ecológica del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

11 Conclusiones

El presente trabajo de investigación se considera como una primera aproximación al estudio de la implementación de energías alternativas, que posiblemente se desarrollen en el municipio de La Mesa, Cundinamarca; se considera viable llevar a cabo una mayor profundización del proyecto en su Fase II.

El desarrollo de este trabajo de grado permite tener una visión general del municipio de La Mesa, específicamente la Inspección municipal de San Joaquín frente a temáticas de energías renovables, debido a que el desarrollo de éstas es muy limitado o nulo en la zona.

La metodología usada para la solución de cada objetivo específico fue la apropiada, dado que permitió obtener los resultados esperados, usando tanto referentes teóricos como las fases experimentales y de campo que se efectuaron a lo largo de todo el desarrollo del proyecto.

Se determinó el Río Apulo como el cuerpo de agua que puede proporcionar condiciones adecuadas para el desarrollo de este tipo de proyectos debido a que siempre presenta un caudal, mientras que las quebradas que se encuentran en la zona objeto de estudio son intermitentes dependiendo la época de lluvia, además de la topografía del terreno de la cuenca, la cual hace que el agua presente una mayor velocidad de flujo, caudal y por ende sea capaz de generar mayor energía eléctrica.

Si bien es cierto que no se pudo extraer el 100% de la energía de la corriente del Río Apulo, se aprovechó la mayor cantidad posible, siendo aproximadamente un 70% de rendimiento, gracias al diseño óptimo de la turbina Vortex, propuesto por Turbulent.

El proyecto resulta viable en el aspecto económico, debido a que el tiempo de retorno de inversión está estimado a un tiempo corto, siendo un poco más de dos años para comenzar a generar ingresos, lo cual resulta ser un sistema muy rentable.

En cuanto a la viabilidad ecológica del proyecto, resulta óptimo debido a que contribuye a la disminución de gases efecto invernadero y por ende a la disminución del cambio climático, aportando de esta manera al objetivo principal del Protocolo de Kioto y del Acuerdo de París. Por otra parte, no altera el curso natural del Río Apulo debido a que el modelo de Turbulent, retorna el agua utilizada para la generación de energía eléctrica a través de la turbina al cauce natural del río, sin generar ningún tipo de desvío que genere el flujo no habitual del cuerpo de agua, además de esto, el tipo de turbina y de sistema hidroeléctrico es amigable con los peces ya que la energía se produce mediante un vórtice el cual es un flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas, lo que permite que los peces naden libremente.

Por último, resulta ser viable en el ámbito social, debido a que, con la generación de energía eléctrica, suple el déficit existente en un 69,56%, permitiendo mejorar la calidad de vida de los habitantes de la Inspección municipal de San Joaquín, ya que pueden desarrollar sus actividades domésticas y comerciales de una manera más segura, además, con el diseño y la implementación de la micro central hidroeléctrica se puede generar empleo en la zona.

12 Recomendaciones

Se recomienda continuar con la investigación del modelo en el estudio de factibilidad, siendo ésta su Fase II a mayor profundidad, con el fin de generar un concepto técnico más completo e incrementar las variables del proyecto para obtener resultados con mayor cobertura.

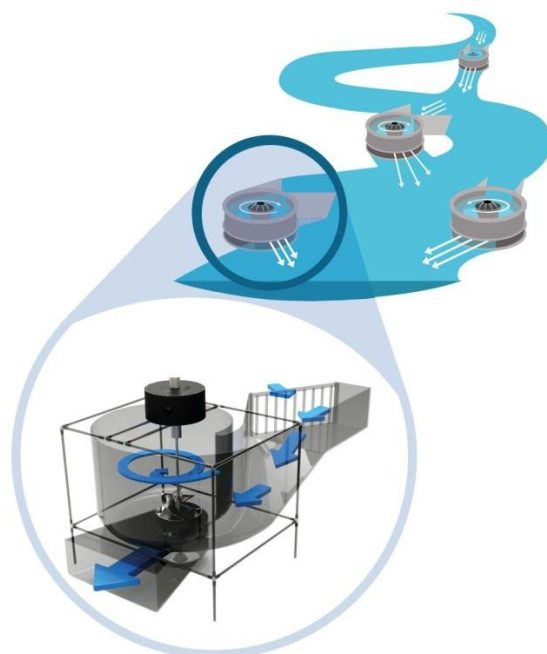
Se recomienda hacer un análisis para el total de la población de la Inspección municipal de San Joaquín en su Fase II, debido a que en el presente estudio solo se tuvo en cuenta el casco urbano.

Sería importante evaluar la viabilidad de la implementación del presente proyecto en los procesos productivos, industriales, residenciales o comerciales del municipio de La Mesa, Cundinamarca, con el fin de aportar a la disminución del cambio climático.

También se recomienda realizar estudios enfocados al uso y tenencia del suelo, en cuanto al área delimitada de la cuenca del Río Apulo a su paso por la Inspección municipal de San Joaquín, además de estudios de impacto ambiental en el suelo a causa de la implementación de este tipo de sistemas hidroeléctricos.

Se recomienda estudiar la viabilidad de implementar un prototipo de doble turbina como se muestra en la Figura 74, para cubrir el déficit existente, teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir del caudal y topografía de la cuenca del Río Apulo.

Figura 74. Prototipo de múltiples turbinas Vortex para mayor eficiencia de generación energética.



Fuente: (Pinterest, 2018)

Por otro lado, se recomienda hacer un estudio de los impactos paisajísticos en cuerpos de agua, por la implementación y operación de micro centrales hidroeléctricas a pequeña escala, también un estudio relacionado con la calidad del agua con base a los vertimientos directos que se realizan aguas arriba, lo cual puede llegar a afectar las condiciones de calidad, estabilidad y eficiencia de la turbina.

13 Referencias Bibliográficas

- Academic. (2010). Pendiente. Obtenido de Geografía:
<http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/919951>
- ACOSTA, A. V. (2016). ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA UBICADA EN LA CUENCA DEL RÍO TEUSACA - VEREDA SAN RAFAEL - SECTOR LA TOGA - LA CALERA -CUNDINAMARCA. Obtenido de Universidad Libre de Colombia:
<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10444/Trabajo%20de%20grado%20Maestria%20Ailyn%20Casta%C3%B1eda.pdf?sequence=1>
- Antioquia, E. d. (2009). TURBINAS HIDRÁULICAS. Obtenido de
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/turbinashidraulicas/turbinashidraulicas.html>
- Apulo, C. M. (2000). Esquema de ordenamiento territorial. Obtenido de Municipio de Apulo:
<http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/5eot%20-%20esquema%20de%20ordenamiento%20territorial%20-%20componente%20general%20-%20apulo%20-%20cundinamarca%20-%202000.pdf>
- Arriols, E. (22 de enero de 2018). Ecología verde. Obtenido de
<https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-sostenibilidad-ambiental-y-social-1070.html>
- Botello, W. (2019). Docente de Calidad del agua. Obtenido de Universidad El Bosque.
- Celis, D. M., Rivas, F. P., & Durana, A. P. (2011). Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de Plan Integral de Manejo de la cuenca alta del Río Apulo :
http://openarchive.icomos.org/1342/1/Itinerario_cultural_zipacon.pdf
- Climático, G. I. (mayo de 2011). Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. Obtenido de Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf
- Concejo municipal de La Mesa. (2001). Plan de desarrollo municipal La Mesa, Cundinamarca. Obtenido de
[http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/pd_plan_de_desarrollo_la_mesa_cundinamarca_2001_2003_acuerdo_\(137_p%C3%A1g_367_kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/pd_plan_de_desarrollo_la_mesa_cundinamarca_2001_2003_acuerdo_(137_p%C3%A1g_367_kb).pdf)
- Concejo municipal de La Mesa. (2008). Plan de desarrollo . Obtenido de La Mesa Cundinamarca:
<http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/plan%20de%20desarrollo%20la%20mesa%20-%20cundinamarca%20-%202008%20-%202011.pdf>
- Cruz, Á. P. (2011). Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de UNA CIUDADANÍA DESGARRADA: Configuración y ejercicio de una ciudadanía

campesina en el corregimiento de San Joaquín:
<http://bdigital.unal.edu.co/5307/1/angelapatricianavarretacruz.2011.pdf>

Corporación Regional de Cundinamarca, (2018). Obtenido de <https://www.car.gov.co/>

CORTOLIMA. (2010). Resolución 0039 de 2010. Obtenido de <http://ovirtual.cortolima.gov.co/docs/reslcns/0/2010/2010r391.pdf>

Ecoforest, & ecológica, P. (2003). Elaboracion del diagnostico, prospectiva y formulacion de la cuenca hidrografica Río Bogotá, Subcuenca Río Apulo. Obtenido de Corporación Autonoma Regional de Cundinamarca: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac254af33ad3.pdf>

El Herald. (2016). Una nueva 'medicina' para la Tierra. Obtenido de <https://www.elheraldo.co/internacional/una-nueva-medicina-para-la-tierra-256549>

Enel Codensa. (marzo de 2019). Consumo energetico La Mesa Cundinamarca.

Enel-Codensa. (2018). Tarifas de energia electrica. Obtenido de Comisión de regulación de energia y gas: <https://www.celsia.com/Portals/0/contenidos-celsia/documentos/tarifas-epsa-enero-2018.pdf>

EPEC. (2018). La tecnología hidroeléctrica. Obtenido de <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/hidroelectricidad.pdf>

ERENOVABLE. (22 de febrero de 2018). Energías limpias. Obtenido de <https://erenovable.com/energias-limpias/>

Fisica práctica. (2019). caudal. Obtenido de <https://www.fisicapractica.com/caudal.php>

Fondo Mundial para la Naturaleza WWF. (octubre de 2010). Caudal ecológico. Obtenido de http://awsassets.panda.org/downloads/fs_caudal_ecologico.pdf

Friedrich, F. E., & Álvarez, F. J. (s.f). La conservación de la energía en los fluidos: hidrodinámica, hidrostática y termodinámica. Obtenido de Energia potencial: https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5868/La_conservacion_de_la_energia_en_los_fluidos__hidrodinamica__hidrostatica_y_termodinamica.__F._Jarabo_Friedrich_F.J._Garcia_Alvarez__N._Elortegui_Escartin.pdf?sequence=1&isAllowed=y

García, A. F. (2016). Dinámica de la partícula y de los sistemas de partículas. Obtenido de Trabajo, energía cinética y energía potencial: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/dinamica/energia/energia.html>

García, C. M. (2016). ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-FINANCIERA DE LA CENTRAL MINIHIDRAULICA "CASAS NUEVAS". Obtenido de UNIVERSIDAD DE JAÉN :

http://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/3626/1/TFG_Segado_Garc%C3%ADa%2CCristobal_Mart%C3%ADn.pdf

García, V. E. (junio de 2013). Diseño de una turbina hidrocínética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2058>

Gas, C. d. (septiembre de 2008). ASPECTOS JURÍDICOS AMBIENTALES PARA PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN COLOMBIA. Obtenido de http://www.creg.gov.co/phocadownload/publicaciones/aspectos_juridicos_ambientales_proy_energeticos.pdf

Gutiérrez, L. d., & Fragoso, M. M. (2012). Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n2/v3n2a7.pdf>

Group, S. (19 de noviembre de 2013). Centro del cambio global y la sustentabilidad. Obtenido de ¿Qué es Sustentabilidad?: <http://ccgss.org/sustentabilidad/>

Hernández, J. M., & Sanz, S. O. (14 de julio de 2008). Diseño eco-hidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <http://www.redalyc.org/pdf/1470/147020257006.pdf>

Hervás, V. (2010). ENERGÍA HIDRÁULICA. Obtenido de <https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2010/10/energia-hidraulica.pdf>

Hugo Altomonte, M. C. (octubre de 2003). Energías renovables y eficiencia energética en América latina y el caribe. Restricciones y perspectivas. . Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6426-energias-renovables-eficiencia-energetica-america-latina-caribe-restricciones>

IDEAM. (2010). Atlas climatologico. Obtenido de clima: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

IDEAM. (2010). Atlas climatologico. Obtenido de Precipitacion: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

IDEAM. (2010). Atlas climatologico. Obtenido de Temperatura: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

IDEAM. (2010). Atlas Climatologico. Obtenido de http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/cundinamarca_texto.pdf

inhabitat. (8 de febrero de 2018). La turbina de hidromasaje apta para peces hace que la hidroelectricidad vuelva a ser verde. Obtenido de <https://inhabitat.com/fish-friendly-whirlpool-turbine-makes-hydropower-green-again/>

Jasper & Geert. (2015). Turbulent Hydro. Obtenido de La planta más rentable de energía micro hidro: <https://www.turbulent.be/?lang=es>

- López, E. D. (2000). *El protocolo de Kioto y su desarrollo en España. El fomento de las energías renovables y de la cogeneración eléctrica como instrumento de lucha frente al efecto invernadero.* Obtenido de <https://search-proquest-com.ezproxy.unbosque.edu.co/central/docview/2012121557/BF3938ABA9AC418BPQ/1?accountid=41311>
- Mannise, R. (2018). *Ecocosas. Obtenido de Micro Hidroeléctrica usa un remolino para generar energía limpia.: https://ecocosas.com/energias-renovables/micro-hidroelectrica-usa-un-remolino-para-generar-energia-limpia/?cn-reloaded=1*
- Marín, C. E., & Marín, R. G. (2010). *Agua y energía: producción hidroeléctrica en España.* Obtenido de <https://www.investigacionesgeograficas.com/article/view/2010-n51-agua-y-energia-produccion-hidroelectrica-en-espana>
- MESA, A. M. (29 de diciembre de 2014). *DECRETO No. 140 DE 2014.* Obtenido de http://lamesacundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/lamesacundinamarca/content/files/000041/2008_manualdefinitivo1.pdf
- México, P. d. (2007). *Plan nacional de desarrollo.* Obtenido de <http://pnd.calderon.presidencia.gob.mx/sustentabilidad-ambiental.html>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2016). *El Acuerdo de París. Así actuara Colombia frente al cambio climatico.* Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/el_acuerdo_de_paris_frente_a_cambio_climatico.pdf
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2014). *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.* Obtenido de Decreto Ley 2811 de 1974: <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-Ley-2811-de-1974.pdf>
- Ministerio de minas y energía (1994). *Ley 143 de 1994.* Obtenido de <https://justiciaambientalcolombia.org/herramientas-juridicas/legislacion-ambiental/>
- Ministerio de minas y energía (03 de octubre de 2001). *LEY 697 DE 2001.* Obtenido de http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/LEY6972001.pdf
- Ministerio de minas y energía (01 de junio de 2014). *COLOMBIA NORMATIVIDAD EFICIENCIA ENERGÉTICA Y USO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS.* Obtenido de <https://aidterritorial.org/2014/06/01/colombia-normatividad-eficiencia-energetica-y-uso-de-energias-alternativas/>
- Miñarro, J. R. (2012). *La energía.* Obtenido de http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/mecanica.htm?1&3

- Navarro, D. C., & Liévano, J. M. (2004). *Guía para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos*. Obtenido de <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis15.pdf>
- Pinterest. (2018). *Descubre ideas sobre Turbina De Agua*. Obtenido de <https://www.pinterest.co.uk/pin/255297872612036212/>
- PIVingenieria. (2018). *Beneficios de una hidroelectrica*. Obtenido de <https://www.pivingenieria.com/energia-1>
- Portillo, G. (13 de octubre de 2017). *METEOROLOGIA EN RED*. Obtenido de Las precipitaciones: <https://www.meteorologiaenred.com/las-precipitaciones.html>
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la investigación*. Obtenido de <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Sánchez, T., Escobar, R., Ramírez, S., Canedo, W., Gamarra, A., & Guzmán, Y. (2010). *Microcentrales hidroeléctricas*. Obtenido de *Una alternativa para el desarrollo rural*: http://cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/130bib_arch.pdf
- Secretaria de planeación. (15 de agosto de 2017). Obtenido de La Mesa: http://www.cundinamarca.gov.co/Home/SecretariasEntidades.gc/Secretariadeplaneacion/SecretariadeplaneacionDespliegue/asmapas_contenidos/csecreplanea_mapas_mapasdepart
- Serna, L. A. (diciembre de 2008). *GARANTÍA DE SUMINISTRO Y SOSTENIBILIDAD DEL MODELO ENERGÉTICO*. Obtenido de <https://search-proquest.com.ezproxy.unbosque.edu.co/central/docview/1349934120/fulltextPDF/BF3938ABA9AC418BPQ/18?accountid=41311>
- TURBULENT. (2018). Obtenido de *Modelos de turbina*: <https://www.turbulent.be/turbine-models>
- TURBULENT. (2018). *Precios*. Obtenido de *¿Qué ingresos puede generar mi río?:* <https://www.turbulent.be/pricing>
- TURBULENT. (2018). *Tecnología*. Obtenido de <https://www.turbulent.be/technology>
- Unidad de Planeación Minero Energética, C. U. (07 de octubre de 2015). *Atlas hidroenergético de Colombia*. Obtenido de http://www1.upme.gov.co/Documents/Atlas/Atlas_p25-36.pdf
- Universidad Politecnica de Madrid. (1998). *Richard Feynman*. Obtenido de *Energia*: <https://viaxeaitaca.files.wordpress.com/2011/07/energia-en-la-historia.pdf>
- Vargas, F. E., Alarcón, A. F., & Fajardo, C. A. (08 de noviembre de 2011). *Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica*. Obtenido de http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/viewFile/22/27