



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,**

**INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN.**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.**

**“ANÁLISIS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA PARA  
ESTACIONES DE BOMBEO, CON ENERGIA DE  
CONDUCCIONES DE AGUA. CASO DE ESTUDIO PROYECTO  
DE RIEGO MINAS.”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: PABLO CESAR CARDONA VIVAR**

**DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA**

**CUENCA-ECUADOR**

**2024**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN.**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.**

**“ANÁLISIS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA PARA ESTACIONES  
DE BOMBEO, CON ENERGÍA DE CONDUCCIONES DE AGUA. CASO  
DE ESTUDIO PROYECTO DE RIEGO MINAS.”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.**

**AUTOR: PABLO CESAR CARDONA VIVAR**

**DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA, PhD**

**CUENCA - ECUADOR**

**2024**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

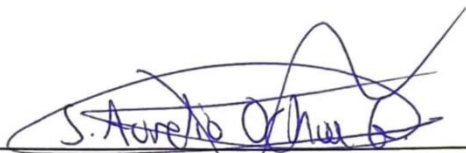
**Pablo Cesar Cardona Vivar**, portador de la cédula de ciudadanía N° **0706911153**. Declaro ser el autor de la obra: **“Análisis de generación hidroeléctrica para estaciones de bombeo, con energía de conducciones de agua. Caso de estudio Proyecto de Riego Minas”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 4 de septiembre de 2024

F:   
Pablo Cesar Cardona Vivar  
0706911153

## CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del trabajo de titulación denominado “ANÁLISIS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA PARA ESTACIONES DE BOMBEO, CON ENERGÍA DE CONDUCCIONES DE AGUA. CASO DE ESTUDIO PROYECTO DE RIEGO MINAS”, certifico que fue realizado por PABLO CESAR CARDONA VIVAR, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca, bajo supervisión del suscrito; trabajo que reúne los requisitos necesarios para su presentación y sustentación ante el tribunal que se disponga.



**ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA PhD.**

**C.I. 010415814-2**

**DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DEDICATORIA**

Con mucha alegría y gratitud, dedico esta tesis a mis padres por su apoyo incondicional, por su amor dado en todo momento, y sus alientos para culminar mi formación académica, sin importar los desafíos que se han presentado en el camino.

A mis hermanos por su apoyo incondicional, siendo mi inspiración para seguir adelante y ser un modelo a seguir para mi hermano menor, y el orgullo para mi hermana mayor.

A todo el resto de mi familia que han estado conmigo por años: tíos, primas, mi abuela; nunca han faltado a pesar del tiempo, ni la distancia.

Y a todos los amigos que he conocido en este trayecto, para aquellos que se quedan y se van, por ser una parte del valioso del tiempo que ha pasado hasta llegar a este punto.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia, les agradezco a mis padres, quienes han brindado su completo apoyo para cumplir mis metas académicas y objetivos. Su cariño ha sido infaltable a lo largo de mis estudios, y siempre serán mi soporte para llevar a cabo mis metas y objetivos personales.

A mis hermanos, primos, tíos y abuela, por siempre ser una familia unida y contar con ellos en cualquier momento, por ser un orgullo para ellos, y demostrar que todo el esfuerzo no fue en vano.

A mis amigos, quienes, a lo largo de horas compartidas, se ha llevado bastantes experiencias que quedarán de recuerdo, y espero contar con ellos en lo que espera en el futuro.

## RESUMEN

El uso del agua potable como generación de energía se ha visto a lo largo de la historia, desde el Antiguo Egipto y Mesopotamia hasta la actualidad con las centrales hidroeléctricas. En Ecuador, el 92% de la electricidad proviene de fuentes hidroeléctricas, usada por ser un recurso sustentable.

En este trabajo se plantea el uso del agua potable que circula por las líneas de conducción para el alimento de estaciones de bombeo hacia las comunidades de la parroquia Ludo. Tras el análisis realizado, se obtiene que, por medio de las pérdidas, las turbinas reducen la altura a la cual el agua alcanza en los tramos, dificultando su llegada. A su vez, la energía que se genera mediante las turbinas no es suficiente para abastecer todas las estaciones de bombeo planteadas, por la cual se debe implementar otras fuentes renovables o la aplicación de energía del Estado para llevar a cabo las conducciones del agua.

*Palabras clave:* Estaciones de bombeo, Allievi, parroquia Ludo, energía renovable.

## **ABSTRACT.**

The use of drinking water for power generation has been seen throughout history from Ancient Egypt and Mesopotamia to the present day with hydroelectric power plants. In Ecuador, 92% of the electricity is generated from hydroelectric sources used as a sustainable resource.

In this work, we propose using drinking water that circulates through pipelines to supply the pumping stations to the communities of the Ludo parish. After the analysis, it was found that, due to the losses, the turbines reduce the height at which the water reaches the sections, thereby impeding its arrival. In turn, the energy generated by the turbines is insufficient to supply all the proposed pumping stations, so other renewable sources or state-provided energy must be implemented to carry out the water conveyance.

*Keywords:* Pumping stations, Allievi, Ludo parish, renewable energy.

## INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I. INTRODUCCION.....	17
1.1. Contexto y relevancia de la investigación.....	18
1.2. Formulación y delimitación del problema .....	19
1.3. Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivos Específicos.....	20
CAPITULO II. REVISION DE LA LITERATURA.....	21
2.1. Estado del arte .....	21
2.2. Antecedentes .....	22
2.2.1 Parroquia Ludo.....	22
2.2.2 Proyecto de riego Minas Ludo .....	29
2.3. Marco Teórico.....	39
2.3.1 Hidroelectricidad.....	39
2.3.2 Turbinas hidráulicas.....	40
2.3.3 Turbinas de acción.....	40
2.3.4 Turbinas de reacción.....	41
2.3.5 Energías Renovables.....	42
CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	50
3.1. Factores en el estudio .....	50
3.2. Recopilación de datos.....	52
3.2.1 Topografía de área de conducción .....	52
3.2.2 Mapa de pendientes.....	53

3.2.3	Topografía de áreas de conducción a analizar .....	55
3.3.	Cálculo de generación de energía eléctrica .....	57
3.4.	Potencias requeridas en las bombas .....	59
CAPITULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		60
4.1.	Análisis de conducción del proyecto.....	60
4.1.1	Conducción Cazhapugro – La Esperanza .....	61
4.1.2	Conducción Collana – Tucto – Primero de Enero .....	62
4.1.3	Longitudes de salto a evaluar.....	64
4.1.4	Determinación del tipo de turbina a aplicar.....	69
4.2.	Análisis de punto de inicio y final de bombeo .....	72
4.2.1	Tramo Cazhapugro – La Esperanza.....	72
4.2.2	Tramo Collana – Primero de Enero .....	73
4.2.3	Tramo Collana – Tucto .....	73
4.3.	Análisis de la potencia requerida .....	74
4.3.1	Tramo Cazhapugro – La Esperanza.....	75
4.3.2	Tramo Collana – Primero de Enero .....	77
4.3.3	Tramo Collana – Tucto .....	80
4.4.	Análisis de la potencia que se puede generar a partir de los datos hidráulicos	
	85	
4.4.1	Tramo Cazhapugro – La Esperanza.....	85
4.4.2	Tramo Collana – Primero de Enero .....	88
4.4.3	Tramo Collana – Tucto .....	90
4.5.	Manejo del software Allievi para un correcto funcionamiento del sifón	92

4.5.1	Datos ingresados al programa.....	93
4.5.2	Análisis de régimen permanente.....	98
4.5.3	Análisis de régimen transitorio.....	103
4.6.	Análisis de pérdidas a lo largo de las líneas de conducción.....	106
4.6.1	Tramo Cahzapugro – La Esperanza.....	107
4.6.2	Tramo Collana – Primero de Enero.....	112
4.6.3	Tramo Collana – Tucto.....	115
4.7.	Análisis de producción de energía vs demanda.....	119
4.7.1	Cahzapugro – La Esperanza.....	120
4.7.2	Collana – Primero de Enero.....	121
4.7.3	Collana – Tucto.....	122
4.8.	Análisis de alternativas para producción de energía eléctrica.....	122
4.8.1	Energía eólica.....	123
4.8.2	Energía solar.....	125
4.8.3	Otras alternativas.....	129
4.9.	Mejor alternativa de producción de energía.....	129
4.10.	Complementación de necesidad de energía con energía del estado	131
CAPITULO V. CONCLUSIONES.....		137
CAPITULO VI. RECOMENDACIONES.....		139
BIBLIOGRAFÍA.....		140
ANEXOS.....		145

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Ubicación de la parroquia Ludo, cantón Sígsig.</i> .....	23
Figura 2. <i>Desigualdad y Pobreza en Sígsig, año 2010.</i> .....	24
Figura 3. <i>Población demandante potencial actual por género de habitantes del área rural de la parroquia Ludo, Sígsig.</i> .....	27
Figura 4. <i>Ubicación de comunidades del cantón Sígsig.</i> .....	28
Figura 5. <i>Comunidades a servir con proyecto "Mejoramiento del sistema de riego Río Minas Ludo".</i> .....	29
Figura 6. <i>Temperatura atmosférica del cantón Sígsig.</i> .....	31
Figura 7. <i>Gráfica de líneas con caudales medios mensuales generados en el río Minas.</i> 33	
Figura 8. <i>Mapa de precipitación anual a nivel parroquial.</i> .....	35
Figura 9. <i>Porcentaje de cobertura provincial por zonas con mayor cantidad de meses secos.</i> .....	39
Figura 10. <i>Funcionamiento de la célula solar.</i> .....	46
Figura 11. <i>Elementos considerados para la generación de biomasa.</i> .....	48
Figura 12. <i>Rango de aplicación de turbinas hidráulicas.</i> .....	51
Figura 13. <i>Planta de conducción del sistema de riego Minas Ludo, abscisa 0+000–9+000.</i> .....	52
Figura 14. <i>Planta de conducción del sistema de riego Minas Ludo, abscisa 9+000-15+903.</i> .....	53
Figura 15. <i>Trazado de ruta Cahzapugro - La Esperanza.</i> .....	55
Figura 16. <i>Trazado de ruta Collana - Primero de Enero.</i> .....	56
Figura 17. <i>Trazado de ruta Collana - Tucto.</i> .....	56

Figura 18. <i>Distribución de caudal hacia comunidades.</i> .....	60
Figura 19. <i>Distribución de caudales Cazhapugro - La Esperanza.</i> .....	61
Figura 20. <i>Distribución de caudales para primera alternativa.</i> .....	63
Figura 21. <i>Distribución de caudales para segunda alternativa.</i> .....	64
Figura 22. <i>Perfil de elevación entre las comunidades de Cazhapugro y La Esperanza.</i> .	65
Figura 23. <i>Perfil de elevación entre las comunidades de Collana y Primero de Enero...</i>	67
Figura 24. <i>Perfil de elevación entre las comunidades de Collana y Tucto.</i> .....	68
Figura 25. <i>Nomograma para selección de turbina a aplicar de acuerdo al caudal y salto de agua.</i> .....	70
Figura 26. <i>Tipo de turbina a aplicar según los datos analizados.</i> .....	71
Figura 27. <i>Planteamiento de estaciones de bombeo para el tramo Cazhapugro – La Esperanza.</i> .....	72
Figura 28. <i>Planteamiento de estaciones de bombeo para el tramo Collana – Primero de Enero.</i> .....	73
Figura 29. <i>Perfil topográfico de tramo Collana – Tucto, con las estaciones de bombeo colocadas.</i> .....	74
Figura 30. <i>Diferencia de cotas a analizar en primer salto de la ruta Cazhapugro - La Esperanza.</i> .....	75
Figura 31. <i>Diferencia de cotas a analizar en segundo salto de la ruta Cazhapugro - La Esperanza.</i> .....	76
Figura 32. <i>Diferencia de cotas a analizar en primer salto de la ruta Collana - Primero de Enero.</i> .....	78

Figura 33. <i>Diferencia de cotas a analizar en segundo salto de la ruta Collana - Primero de Enero.</i> .....	79
Figura 34. <i>Diferencia de cotas a analizar en primer salto de la ruta Collana - Tucto.</i> ...	81
Figura 35. <i>Diferencia de cotas a analizar en segundo salto de la ruta Collana - Tucto.</i> ..	82
Figura 36. <i>Diferencia de cotas a analizar en tercer salto de la ruta Collana - Tucto.</i> ....	84
Figura 37. <i>Trazado de rutas para su análisis en Allievi.</i> .....	94
Figura 38. <i>Configuración de tubería para perfiles de conducción.</i> .....	96
Figura 39. <i>Configuración de datos para cálculo de inercia en su punto óptimo.</i> .....	98
Figura 40. <i>Dibujo de línea de conducción Cazhapugro - La Esperanza.</i> .....	99
Figura 41. <i>Análisis de presión en nudos en el régimen permanente del tramo Cazhapugro - La Esperanza.</i> .....	100
Figura 42. <i>Dibujo de línea de conducción Collana – Primero de Enero.</i> .....	101
Figura 43. <i>Análisis de presión en nudos en el régimen permanente del tramo Collana - Primero de Enero.</i> .....	101
Figura 44. <i>Dibujo de línea de conducción Collana – Tucto.</i> .....	102
Figura 45. <i>Análisis de presión en nudos en el régimen permanente del tramo Collana - Tucto.</i> .....	103
Figura 46. <i>Análisis de presiones en régimen transitorio del tramo Cazhapugro - La Esperanza.</i> .....	104
Figura 47. <i>Análisis de presiones en régimen transitorio del tramo Collana - Primero de Enero.</i> .....	105
Figura 48. <i>Análisis de presiones en régimen transitorio del tramo Collana - Tucto.</i> ....	106
Figura 49. <i>Trazado de tramo Cazhapugro - La Esperanza para análisis en EPANET.</i> ..	107

Figura 50. <i>Curva de desempeño de Bomba 30 HP.</i> .....	108
Figura 51. <i>Curva de desempeño de Bomba 15 HP.</i> .....	109
Figura 52. <i>Curva de rendimiento de turbinas Pelton.</i> .....	109
Figura 53. <i>Análisis de altura alcanzada de fluido en EPANET del tramo Cahzapugro – La Esperanza.</i> .....	110
Figura 54. <i>Trazado de tramo Collana - Primero de Enero para análisis en EPANET.</i> ..	112
Figura 55. <i>Curva de desempeño de Bomba 40 HP.</i> .....	113
Figura 56. <i>Análisis de altura alcanzada de fluido en EPANET del tramo Collana - Primero de Enero.</i> .....	114
Figura 57. <i>Trazado de tramo Collana - Tucto para análisis en EPANET.</i> .....	116
Figura 58. <i>Curva de desempeño de Bomba 20 HP.</i> .....	117
Figura 59. <i>Análisis de altura alcanzada de fluido en EPANET del tramo Collana - Tucto.</i> .....	118
Figura 60. <i>Velocidad del viento del cantón Sígsig.</i> .....	123
Figura 61. <i>Cálculo de densidad de potencia y potencia generada por turbinas eólicas.</i> 125	
Figura 62. <i>Portal del DAVE correspondiente a la NASA.</i> .....	126
Figura 63. <i>Valores de hora pico solar dependiendo de la orientación de la superficie.</i> 127	
Figura 64. <i>Cálculo de energía solar fotovoltaico.</i> .....	128
Figura 65. <i>Determinación de diámetros de rotor para generar energía eólica para tramo Cahzapugro - La Esperanza.</i> .....	130
Figura 66. <i>Determinación de diámetros de rotor para generar energía eólica para tramo Collana - Primero de Enero.</i> .....	130

Figura 67. <i>Determinación de diámetros de rotor para generar energía eólica para tramo Collana - Tucto.</i> .....	131
Figura 68. <i>Cargos tarifarios correspondiente a voltajes de nivel medio.</i> .....	135
Figura 69. <i>Cálculo de costo diario y anual de energía complementada por empresa CENTROSUR.</i> .....	136

## **CAPITULO I. INTRODUCCION.**

Dos tercios del planeta está cubierto por el océano, y cerca del 4% de la masa terrestre se encuentra completamente inundado. El agua existe en la hidrósfera en un ciclo continuo, siendo evaporado desde la superficie hacia la atmósfera, y regresando en forma líquida. Todas las formas de vida tienen dependencia del agua y, de forma oportuna, nunca se presentó y jamás se presentará la extinción del agua en su totalidad (Boyd, 2019).

A pesar de lo dicho anteriormente, el agua puede estar en altas y en bajas proporciones dependiendo de la zona, algo que se intensificará según crezca la población de la Tierra. Algunas zonas se encuentran que amplias fuentes de agua, otras con poca agua, y el agua puede ser escasa durante sequías (Boyd, 2019). Por ende, se ha buscado diferentes métodos para el transporte de agua desde sistemas de recolección hasta sistemas para el suministro de agua potable, aprovechando la energía disponible para lograr el caudal necesario (Fernández Ordóñez, 2024).

La generación de energía eléctrica a través del agua se ha ido implementando desde épocas como el Antiguo Egipto y Mesopotamia con las ruedas hidráulicas. Con el avance del tiempo, se ha desarrollado nuevas tecnologías para aprovechar el agua y crear energía eléctrica a través de este recurso renovable. La tecnología del aprovechamiento del agua para la producción de energía busca un mayor desempeño dentro de los campos rurales, siendo de utilidad para el ahorro de consumo eléctrico del Estado y aprovechado por las conducciones de agua, como se detalla en este trabajo de titulación.

## **1.1. Contexto y relevancia de la investigación**

La población urbana del planeta se ha incrementado de manera exponencial, desde 751 millones de habitantes en 1950, hasta 4,2 mil millones de habitantes en el año 2018, e incrementado casi el doble hasta la actualidad. La urbanización es influenciada por varios factores, tales como la evolución de agricultura, la industrialización del país, y estados de pobreza o riqueza del país (Profiroiu et al., 2020). A medida que crece la población, de igual manera crecen las comunidades, tanto urbano como rural, sin importar la topografía aledaña.

Se debe recalcar el tema de la topografía en donde las comunidades se expanden, debido a que, por falta de terrenos a nivel descendiente, los crecimientos se han dado en zonas más altas de las comunidades previamente establecidas. Esto genera un inconveniente al momento de querer conectar a las líneas de conducción, las cuales trabajan a gravedad, y se necesitaría una fuente de energía externa para que el agua acceda a sectores más altos.

Al momento en que circula el agua en las líneas de conducción, se produce energía potencial, la cual puede ser convertida en energía eléctrica utilizando turbinas acopladas a alternadores, contribuyendo a la generación de energía a través de recursos renovables (Cordero Ferrero, 2019).

De modo que la finalidad de la investigación es el aprovechamiento de la energía potencial que se encuentra en las corrientes de agua para producir energía eléctrica, la cual, para solucionar el problema de inaccesibilidad de líquido vital por la topografía del terreno, alimentará estaciones de bombeo para potenciar el agua hacia su punto de destino.

## **1.2. Formulación y delimitación del problema**

Ecuador es conocido por ser una zona montañosa debido a la presencia de la cordillera de Los Andes, generando terrenos con pendientes demasiado elevadas, dificultando el acceso de agua potable sin ayuda de estaciones de bombeo hacia puntos altos desde la conducción del agua. Sin embargo, las comunidades rurales poseen bajos recursos y presupuestos bajos.

El tema de investigación se enfoca al sistema de riego Minas – Ludo, el cual se desarrolla en la parroquia Ludo del cantón Sígsig. En este proyecto, dentro de su segunda etapa de construcción constan estaciones de bombeo para llevar el agua a comunidades ubicadas sobre la cota de llegada del sifón, debido a que es riesgoso someter más carga al sifón en la parte más baja, que es el paso sobre el río Pamar.

Por el bajo presupuesto con el que cuentan las comunidades, se requiere la investigación de fuentes de energía alternativas y renovables, como es el caso de la energía hidroeléctrica a partir del aprovechamiento del flujo de agua que se desplaza por las tuberías de conducción, poseyendo energía potencial que sería convertida en energía eléctrica, la cual abastecerá las estaciones de bombeo para hacer llegar el agua hacia las comunidades que se encuentran encima de la cota de llegada del sifón.

## **1.3. Objetivos.**

### **1.3.1 Objetivo General.**

- Evaluar hidráulicamente el sifón del proyecto de riego Minas – Ludo; mediante el uso de turbinas hidráulicas y bombas centrífugas de agua por determinar según datos hidráulicos, para abastecer comunidades ubicadas en cotas más altas de la llegada de agua en el sifón.

### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Analizar la oferta y demanda de agua potable del proyecto mediante la revisión de datos previos del proyecto para indicar las comunidades servidas y a servir.
- Estudiar el movimiento de fluidos en conducciones con grandes sifones mediante el uso de softwares como Allievi y EPANET para identificar zonas más sometidas a presión y presencias de cavitaciones, como las pérdidas que se generan a lo largo de las líneas de conducción.
- Sugerir fuentes de energía alternativas para la alimentación de estaciones de bombeo por medio de investigaciones bibliográficas y cálculos para establecer la mejor alternativa de energía renovable dentro del proyecto.

## CAPITULO II. REVISION DE LA LITERATURA

### 2.1. Estado del arte

A continuación, se detalla acerca de los estudios previos de acuerdo a la generación de energía eléctrica mediante el uso de recursos hídricos, las fuentes alternativas para la producción de energía renovable, y la eficiencia energética que sean sustentables para su uso; las cuales se consideran dentro del impacto del proyecto de investigación.

El hombre comenzó a considerar el agua como una de las fuentes para la producción de energía desde su descubrimiento. La primera evidencia de esto fue la rueda hidráulica, usada en Egipto y Mesopotamia en torno al año 1000 a.C. A su vez, Leonardo Da Vinci estableció principios para emplear la energía hidráulica, tales como: la potencia que genera el agua depende de la altura, se pierde una parte de la potencia generada por la fricción, y la mayor eficiencia de una rueda hidráulica se logra obtener al momento en que choca el agua con las paletas de la rueda a un ángulo de 90° (Martín & Infante, 2021).

A su vez, la Unión Europea tiene como objetivo promocionar la electricidad que se genera por medios renovables. El marco legislativo está basado en el “Libro Blanco para una Estrategia Común y un Plan de Acción para las Energías Renovables”. El objetivo principal del Libro Blanco es el incremento de 4500 MW de potencia en minicentrales hidroeléctricas hasta el año 2010, generando un incremento en la producción anual desde los 37 TWh hasta los 55 TWh. Posterior a esto se promociona la electricidad producida por fuentes de energía renovable dentro del mercado eléctrico, estableciendo una meta de generar el 12% de electricidad mediante recursos renovables. La Unión Europea también promociona sistemas de apoyo para producir energía renovable, tales como: certificados verdes, devoluciones de impuestos y apoyo directo a precios. Una gran parte

del potencial europeo proviene de la rehabilitación y ampliación de instalaciones hidroeléctricas ya existentes (Mateos Rodríguez & Leco Berrocal, 2011).

Considerando el desgaste de recursos no renovables para la producción de energía como los combustibles fósiles, se deben buscar fuentes para la generación de energía que sean sustentables y renovables, con la intención de no ocasionar daños o contaminar el medio ambiente. Al momento de aplicar microturbinas para la generación de energía a través de medios hidráulicos, se observa que la electricidad que se genera puede ser consumida dentro de las propias instalaciones, cumpliendo con la eficiencia energética dentro del ciclo del agua (Cordero Ferrero, 2019).

Debido al cambio climático, la cual está vinculado al crecimiento poblacional, dio origen al desarrollo sustentable con la finalidad de no afectar poblaciones futuras. Todas las áreas de generación de energía renovable crecen de una forma considerable en todo el planeta, logrando nuevos diseños y avances tecnológicos para el mejor aprovechamiento. También se debe tomar en cuenta que la mejora en la eficiencia energética tiene gran relevancia de acuerdo a los temas de ahorros y beneficios con respecto al cambio climático y la producción de energía. Se deben desarrollar bases de información energética para el manejo y futura recomendación de mejoras energéticas, implementando la innovación de energías renovables (Romero-Hernández et al., 2011).

## **2.2. Antecedentes**

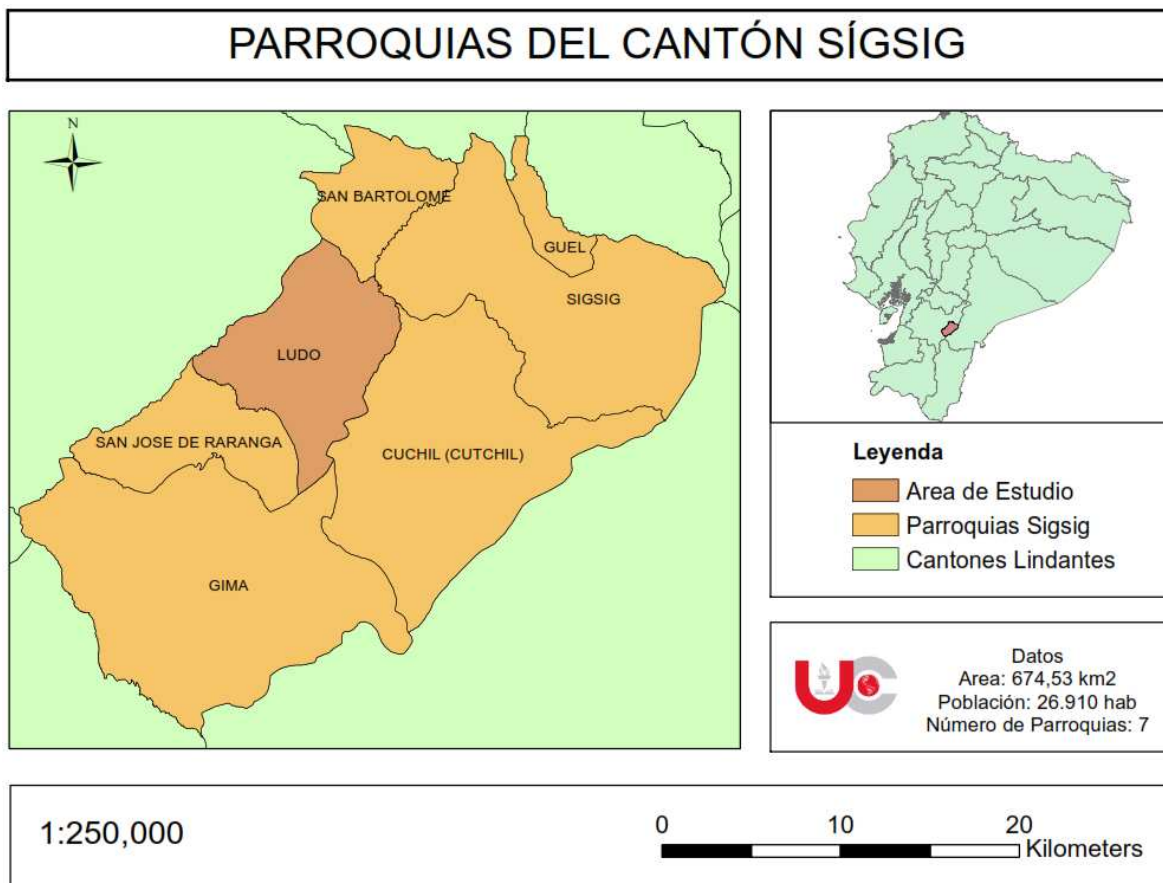
### **2.2.1 Parroquia Ludo**

- **Ubicación.**

La parroquia Ludo pertenece al cantón Sígsig, provincia del Azuay. Se encuentra a 60 km al sureste de la ciudad de Cuenca. A sus alrededores se encuentra: en el norte la parroquia San

Bartolomé, por el sur las parroquias San José de Raranga y Jima, por el este la parroquia Cutchil y al oeste la parroquia Quingeo. Cuenta con una superficie de 69.9 km<sup>2</sup>, representando el 10.9% de la superficie total del cantón Sígsig, con un rango de altura que oscila entre los 2500 msnm y los 3300 msnm (Quito Bernal & Cárdenas Cordero, 2022).

**Figura 1.** Ubicación de la parroquia Ludo, cantón Sígsig.



**Fuente:** Autoría propia.

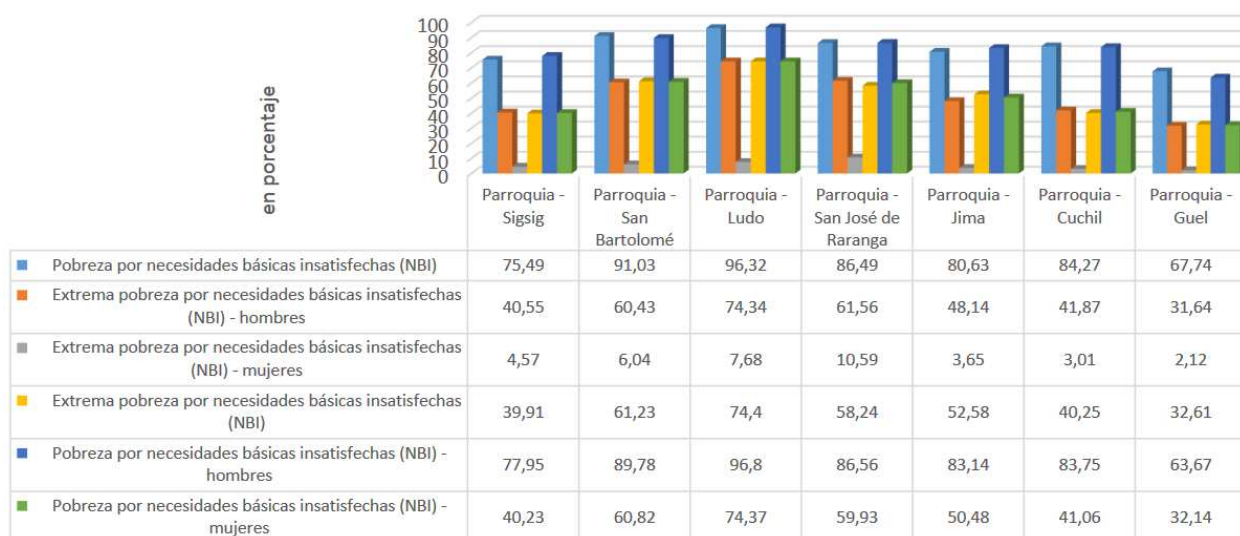
- **Necesidades básicas insatisfechas.**

Se trata de evaluar de manera directa la satisfacción de las necesidades básicas dentro de un hogar, mediante el uso de encuestas acerca de los bienes y servicios de las cuales se disponen en el domicilio. Fue introducido por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe

(CEPAL), con la intención del aprovechamiento de la información de censos, demográficos, y de vivienda, al momento de la caracterización de pobreza (GEOLIDERAR, 2018).

El porcentaje de pobreza por necesidades básicas insatisfechas (NBI) en el cantón Sígsig es del 79.16%, siendo mayor que el porcentaje de pobreza nacional, la cual alcanza un 56.15%. Se debe destacar que, del nivel de pobreza presente en el cantón Sígsig, el 88.05% proviene del sector rural, y el sector urbano cuenta con el 27.81% de pobreza (GEOLIDERAR, 2018).

**Figura 2.** Desigualdad y Pobreza en Sígsig, año 2010.



**Fuente:** (GEOLIDERAR, 2018)

Como se puede indicar en la figura 1, el 96.32% de la población presente en la parroquia Ludo presenta pobreza por NBI, siendo de las parroquias con mayor índice en el cantón Sígsig junto con la parroquia San Bartolomé, las cuales se evalúan según algunas características de vivienda, tales como: acceso a agua potable, sistema de eliminación de excretas, número de miembros del hogar, asistencia escolar de menores, entre otros. El hogar que posea al menos 1 NBI se considera bajo

el rango de pobreza, en cuanto a extrema pobreza por NBI, la mayor tasa se ubica en la parroquia Ludo con el 74.4% (GEOLIDERAR, 2018).

- **Población actual.**

El análisis de la población corresponde al VII Censo de Población, proveniente del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) 2010; permitiendo la demanda y oferta de la población. La población demandante potencial corresponde a la población del área rural de la parroquia Ludo del cantón Sísig, perteneciente a la provincia del Azuay.

Como los datos son pertenecientes al VII Censo de Población, realizado en el año 2010, se aplica una tasa de crecimiento exponencial del 1.95% con una proyección para el 2019, siendo año base del estudio debido a la autorización del proyecto por la institución ejecutora Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial del Azuay (GAPD Azuay).

Para el cálculo de la población desde el VII Censo de Población hasta el año de estudio para el proyecto de riego, se considera la siguiente ecuación:

**Ecuación 1.** *Método exponencial para proyección de población futura.*

$$P_f = P_a * (1 + t)^n$$

En donde:

**Pf:** Población futura;

**Pa:** Población actual;

**t:** Tasa de crecimiento;

**n:** Intervalo de tiempo entre población futura y población actual.

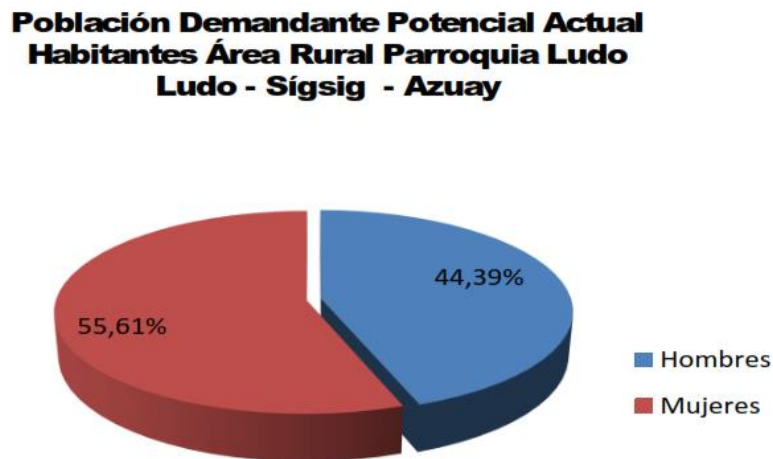
**Tabla 1.** *Población demandante actual de la parroquia Ludo.*

<b>Año</b>	<b>Hombres</b>	<b>Mujeres</b>	<b>Total</b>
<b>2010</b>	1494	1872	3366
<b>2011</b>	1523	1909	3432
<b>2012</b>	1553	1946	3499
<b>2013</b>	1583	1984	3567
<b>2014</b>	1614	2022	3636
<b>2015</b>	1645	2062	3707
<b>2016</b>	1678	2102	3780
<b>2017</b>	1710	2143	3853
<b>2018</b>	1744	2185	3929
<b>2019</b>	1778	2227	4005

**Fuente:** (Dirección de Riego, Drenaje y Aguas Subterráneas, 2019).

La población desagregada, por género, corresponde el 55.61% a mujeres y el 44.39% a hombres, lo cual se puede reflejar en el siguiente gráfico.

**Figura 3.** Población demandante potencial actual por género de habitantes del área rural de la parroquia Ludo, Sígsig.

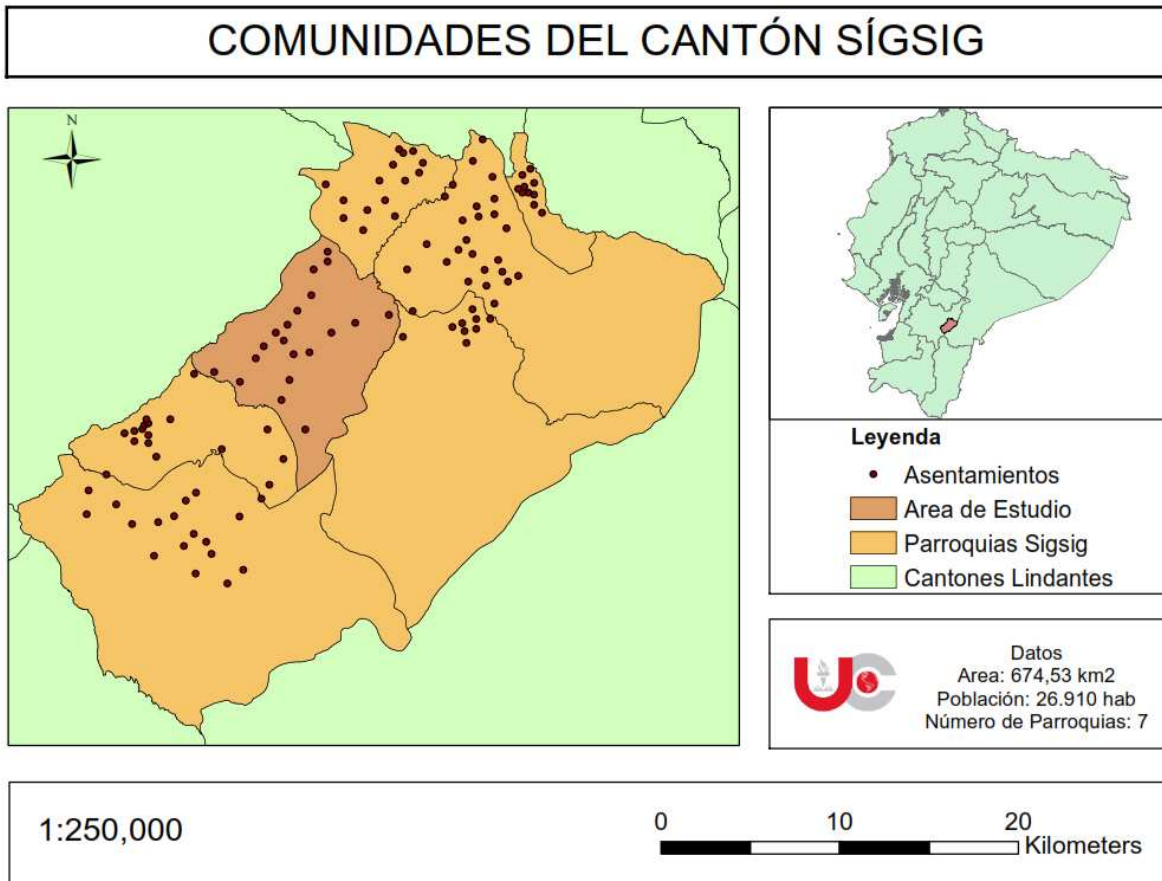


**Fuente:** (Dirección de Riego, Drenaje y Aguas Subterráneas, 2019).

- **Ubicación de comunidades pertenecientes al cantón.**

El cantón Sígsig se divide en 6 parroquias rurales, las cuales son: Cutchil, Güel, Jima, San Bartolomé, San José de Raranga y Ludo, las cuales se subdividen en varias comunidades. La ubicación de las comunidades se obtuvo con la ayuda del Geoportal del Agro Ecuatoriano, proporcionado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). En la figura 5, se proporciona el mapa con la ubicación de todas las comunidades presentes en el cantón Sígsig.

**Figura 4.** *Ubicación de comunidades del cantón Sigsig.*

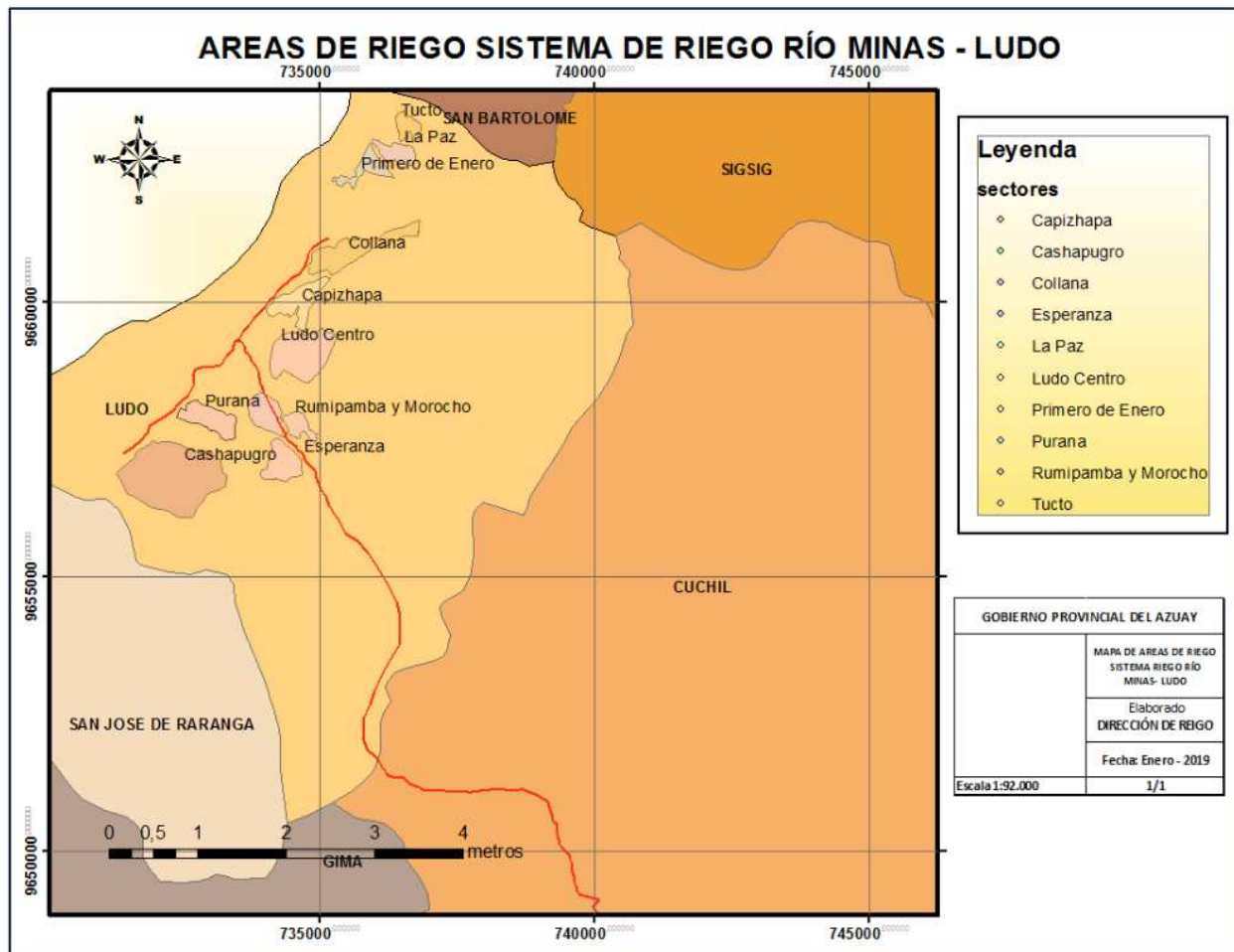


**Fuente:** Autoría propia.

- **Ubicación de comunidades a servir con proyecto.**

El proyecto “Mejoramiento del sistema de riego río Minas Ludo” contempla las siguientes comunidades: La Esperanza, Capizhapa, Cahzapugro, Purana, Rumipamba y Morocho, Ludo Centro, Collana, Primero de Enero, La Paz, y Tucto; cuyas ubicaciones se pueden detallar en la siguiente figura (Dirección de Riego, Drenaje y Aguas Subterráneas, 2019).

**Figura 5.** Comunidades a servir con proyecto "Mejoramiento del sistema de riego Río Minas Ludo".



**Fuente:** (Dirección de Riego, Drenaje y Aguas Subterráneas, 2019).

## 2.2.2 Proyecto de riego Minas Ludo

### • Información general

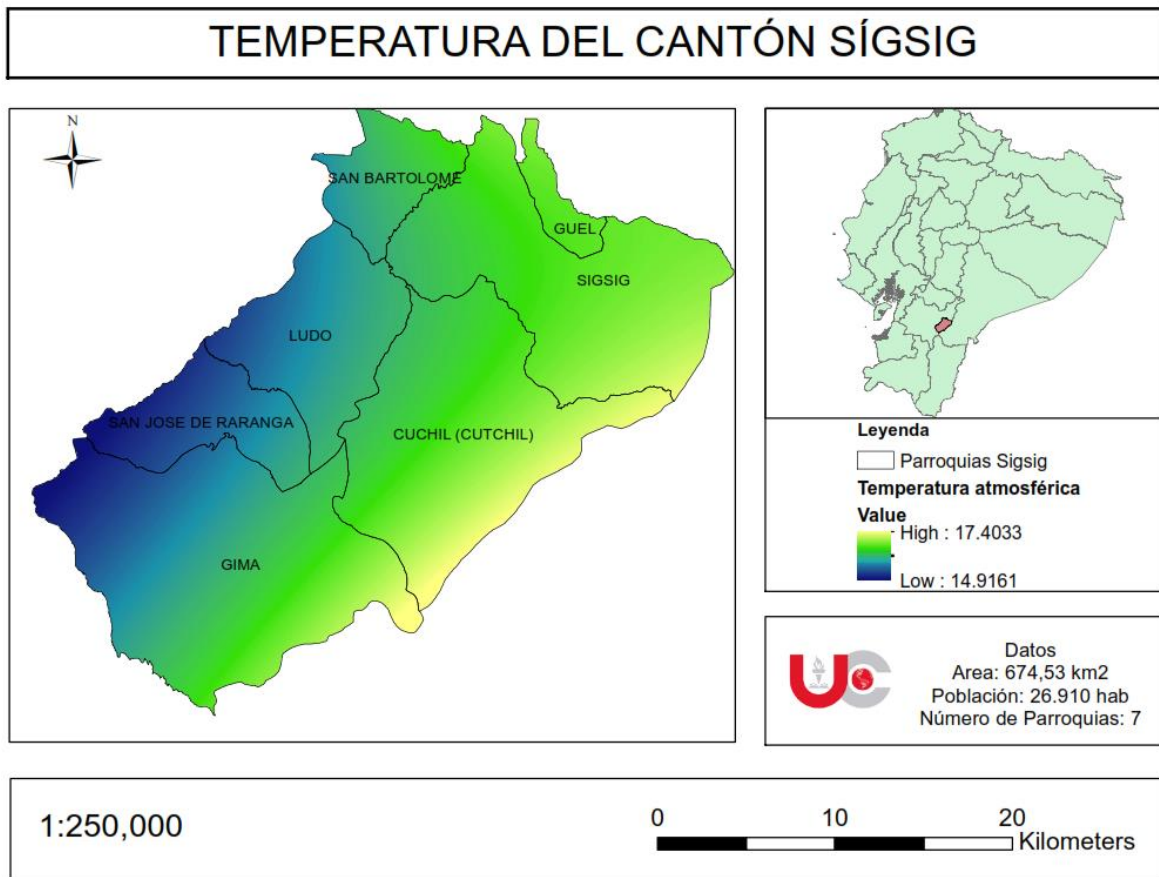
Ubicado en la parroquia Ludo, cantón Sígsig, es un proyecto cuyo objetivo es el aprovechamiento de los recursos hídricos provenientes del río Minas para riego, el cual beneficiará a 3000 habitantes en una irrigación de 600 hectáreas en varias comunidades, tales como: La Esperanza, Ludo Centro, Collana, Cashapugro, entre otros (Departamento de Planificación, 2021).

- **Condiciones climáticas**

La temperatura atmosférica es uno de los elementos del clima que se refieren al grado de calor que presenta el aire en un lugar y momento determinados, así como la evolución de dichos elementos en las distintas zonas climáticas. Se considera el elemento meteorológico de mayor importancia al momento de delimitar los tipos climáticos (GAD Parroquial Ludo, 2020).

En el siguiente mapa de isotermas, los rangos de temperatura en el cantón Sígsig varían de los 9° C en las zonas más heladas y 17° centígrados en las zonas más cálidas, teniendo 3 tipos de regímenes de temperatura. Para el caso de la parroquia Ludo se tienen dos tipos: el régimen isotérmico que cubre el 85.25% del territorio en donde se ubican todos los asentamientos humanos de la parroquia; el régimen isomésico que cubre el 14.36% del territorio donde se ubican los bosques protectores de la parroquia, limitando con el cantón Cuenca (GAD Parroquial Ludo, 2020).

**Figura 6.** *Temperatura atmosférica del cantón Sígsig.*



**Fuente:** Autoría propia.

- **Estudio de caudales máximos y mínimos en la zona**

Dentro del proyecto “Mejoramiento del Sistema de Riego Río Minas – Ludo”, se ha realizado un estudio del caudal (Q) que genera a nivel mensual el río Minas, el cual fue realizado para el diseño de una captación localizado en la misma área de estudio. Sin embargo, se debe tomar en consideración el aporte que tendrán las aguas subterráneas dentro del sector del proyecto, por lo que se le ha añadido a la toma de caudal realizado con anterioridad en el río Minas (Dirección de Riego, Drenaje y Aguas Subterráneas, 2019).

Los caudales estimados y el aporte de las aguas subterráneas se pueden detallar en la siguiente tabla, las cuales servirán para establecer los caudales máximos y mínimos que se pueden presentar en la zona del proyecto.

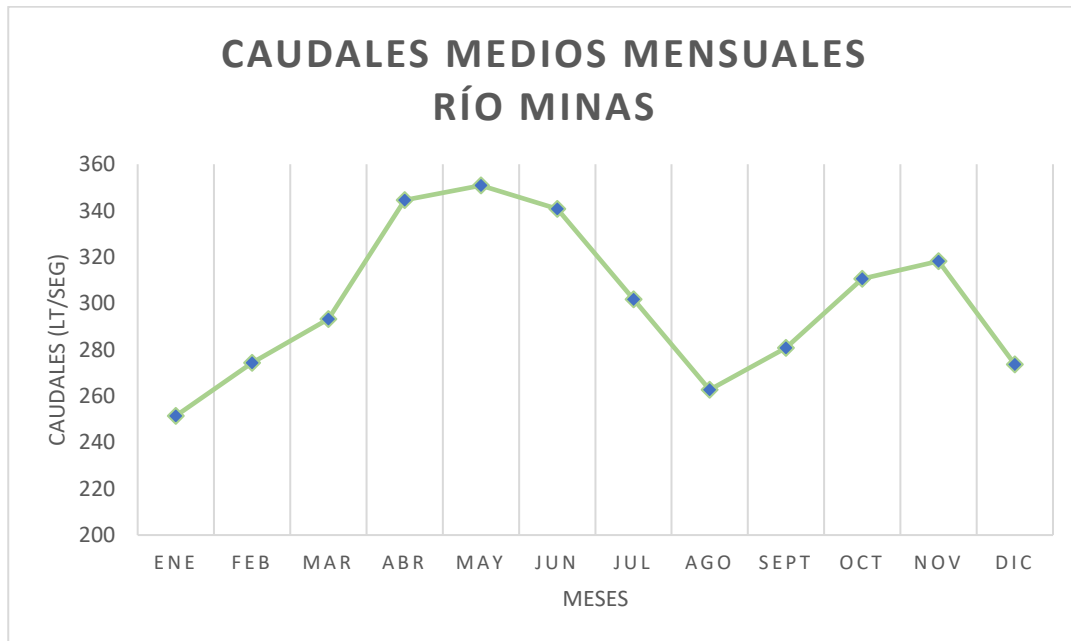
**Tabla 2.** *Valores de caudales considerados para caudales máximos y mínimos.*

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
<i>Caudal estimado (l/s)</i>	206.4 3	228.2 9	246.1 5	296.5 7	298.8 2	291.7 8	253.7 6	220.6 4	237.7 3	264.5 6	272.2 1	226.6 3
<i>Aporte aguas subterráneas (l/s)</i>	45.00	46.00	47.00	48.00	52.00	49.00	48.00	42.00	43.00	46.00	46.00	47.00
<i>Caudal Total (l/s)</i>	251.4 3	274.2 9	293.1 5	344.5 7	350.8 2	340.7 8	301.7 6	262.6 4	280.7 3	310.5 6	318.2 1	273.6 3

**Fuente:** (Dirección de Riego, Drenaje y Aguas Subterráneas, 2019).

Al realizar los análisis del Río Minas, el SENAGUA autorizó un caudal para la captación de 187 l/s, donde no es requerida en su totalidad el caudal autorizado por el SENAGUA, ya que los estudios del río demuestran que es capaz de generar caudales mayores del autorizado, teniendo un caudal mínimo en el mes de enero de 251.43 litros por segundo (l/s), y presentando un caudal máximo en el mes de mayo de un valor de 350.82 l/s.

**Figura 7.** Gráfica de líneas con caudales medios mensuales generados en el río Minas.



**Fuente:** Autoría propia.

- **Balance hídrico**

El balance hídrico se basa en la ecuación de continuidad, analizando la entrada y salida de agua de un espacio territorial a lo largo del tiempo. Al realizar el estudio del balance hídrico, se puede realizar una evaluación cuantitativa de los recursos del agua y las modificaciones que surgen por actividades antrópicas, las cuales pueden causar un déficit hídrico al momento de agotar la demanda de agua en un territorio (GAD Parroquial Ludo, 2020).

Para los estudios hidrológicos del proyecto de riego Minas Ludo, se consideró para el balance hídrico el aporte de las lluvias efectivas y de consumo la evapotranspiración real, correspondiendo a los cultivos que se llevan a cabo en los sectores cercanos a la parroquia. Se considera a su vez el déficit hídrico, siendo la diferencia entre la evapotranspiración de cultivos (Etc) y el aporte que generan las lluvias efectivas. Los valores de evapotranspiración se considera según el cultivo de

maíz de noviembre a junio, y como complemento en los meses de julio a octubre el cultivo de arveja, mientras que la lluvia efectiva se considera la probabilidad de lluvia analizados por datos de fechas anteriores obtenidas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Dirección de Riego, Drenaje y Aguas Subterráneas, 2019).

En la siguiente tabla se consideran los valores obtenidos del estudio realizado previamente para el “Mejoramiento del Sistema de Riego Río Minas – Ludo”, para el cálculo del déficit hídrico que presenta el sector, con datos a nivel mensual.

**Tabla 3.** *Determinación de déficit hídrico en la zona de estudio.*

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>Año</i>
<i>Etc</i>	77.98	84.06	110.40	75.94	56.45	28.68	35.13	71.02	86.83	65.36	40.37	68.41	800.61
<i>PP (mm)</i>	27.69	44.41	39.56	53.44	52.05	33.51	35.72	31.67	27.93	35.74	30.00	27.22	438.94
<i>Déficit (mm/mes)</i>	50.29	39.64	70.83	22.50	4.40	0.00	0.00	39.35	58.90	29.62	10.37	41.19	367.09

**Fuente:** Autoría propia.

- **Precipitación**

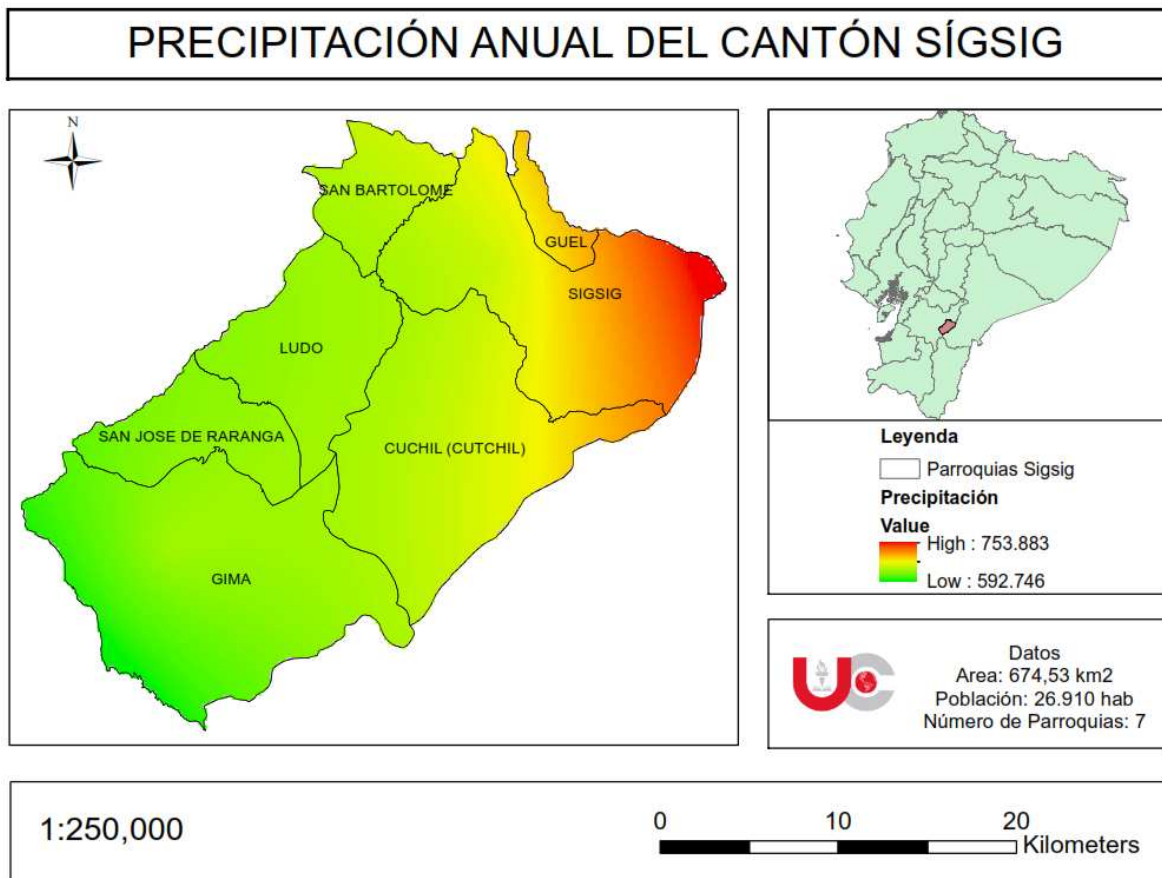
La precipitación fue dada a conocer por el antiguo Instituto Espacial Ecuatoriano y ahora conocido como el Instituto Geográfico Militar (IGM), mediante el uso de tres estaciones meteorológicas con datos mensuales. La ubicación de las estaciones se da a conocer a continuación, de acuerdo al sistema de coordenadas UTM:

**Tabla 4.** Ubicación de estaciones meteorológicas.

Código	Nombre	N (m)	E (m)	Intensidad (mm/mes)
M424	SÍGSIG INAMHI	9662443	745825	728.37
M664	SÍGSIG INECEL	9662474	745856	557.7
M669	JIMA	9646504	727354	673.04

**Fuente:** (Castillo Molina & Vintimilla Bueno, 2019).

**Figura 8.** Mapa de precipitación anual a nivel parroquial.



**Fuente:** Autoría propia.

La parroquia Ludo presentan rangos de precipitación que varían entre los 600 y 700 milímetros anuales, siendo la zona de mayor precipitación ubicada en la zona alta de la parroquia, la zona sur

oriente, en el límite con las parroquias Jima y Cutchil; el mayor porcentaje de precipitación se encuentra en el rango de 650 a 700 mm, el cual cubre el 83.14% del territorio parroquial, ubicándose todos los asentamientos poblados (GAD Parroquial Ludo, 2020).

Para el proyecto de riego Minas Ludo, se analizaron los datos proporcionados por la estación pluviométrica M0424 Sígsig, tomando como un periodo de 11 años para los datos de precipitación, desde el año 2000 hasta 2010, como se detalla en la siguiente tabla.

**Tabla 5.** *Datos de precipitación, estación pluviométrica Sígsig.*

<b>Año</b>	<b>Precipitación (mm)</b>
2000	651.4
2001	600.3
2002	659.0
2003	515.8
2004	412.0
2005	679.1
2006	502.5
2007	1033.3
2008	1175.7
2009	554.3
2010	696.6

**Fuente:** (Dirección de Riego, Drenaje y Aguas Subterráneas, 2019).

- **Evapotranspiración**

La evapotranspiración (ET) consiste en la combinación de los procesos de evaporación y transpiración, en donde el agua se pierde a través de la capa superficial del suelo y mediante la transpiración del cultivo. Ocurren de manera simultánea y no existe manera sencilla de diferenciar

los dos procesos. En el momento de siembra, casi el 100% de la ET ocurre por evaporación; mientras que, cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre por transpiración (G. Allen et al., 2006).

**Tabla 6.** *Evapotranspiración potencial anual de la provincia del Azuay.*

<b>Evapotranspiración (mm/año)</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>550 – 600</b>	7931.24	0.95%
<b>600 – 650</b>	30233.95	3.64%
<b>650 – 700</b>	92974.12	11.19%
<b>700 – 750</b>	99397.35	11.96%
<b>750 – 800</b>	137985.96	16.61%
<b>800 – 850</b>	117017.77	14.09%
<b>850 – 900</b>	50870.49	6.10%
<b>900 – 950</b>	33568.510	4.04%
<b>950 – 1000</b>	32261.11	3.88%
<b>1000 – 1050</b>	34431.32	4.14%
<b>1050 – 1100</b>	36936.87	4.38%

<b>1100 – 1150</b>	38104.47	4.59%
<b>1150 – 1200</b>	40338.74	4.86%
<b>1200 – 1250</b>	36153.94	4.35%
<b>1250 – 1300</b>	29117.80	3.51%
<b>1300 – 1350</b>	12750.39	1.53%
<b>1350 - 1400</b>	1432.42	0.1%
<b>Total</b>	830776.46	100%

*Nota:* para ver mapa de obtención de información, ver Anexo 1.

**Fuente:** (Gobierno Provincial del Azuay, 2019).

Los mapas temáticos que presenta el Instituto Nacional de Meteorología e hidrología (INAMHI) indican que la evapotranspiración a nivel nacional, en la zona del cantón Sígfig, presentan valores de ET anuales promedio entre 800 y 950 milímetros.

- **Meses secos**

Se consideran meses secos a los meses cuya precipitación sea menor a la evapotranspiración. De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, se caracterizan por una precipitación real menor que la evapotranspiración potencial. Esto indica que la precipitación es variable, y depende de la temperatura, aunque se incluyen todos los meses en donde las precipitaciones máximas oscilan entre 500 y 800 mm anuales, en algunas regiones pertenecen a un ciclo climático anual (Hess & Tasa, 2016).

En la siguiente figura, se puede observar que, dentro de la provincia del Azuay se presentan mayores meses secos en la parte sur de la provincia, perteneciendo a la cuenca del río Jubones con un promedio de 8 meses secos al año, mientras que la zona del cantón Sigsig presenta un promedio de 3 meses secos al año, determinando un régimen húmedo.

**Figura 9.** *Porcentaje de cobertura provincial por zonas con mayor cantidad de meses secos.*



*Nota: para ver obtención de información, ver Anexo 2.*

**Fuente:** (Gobierno Provincial del Azuay, 2019).

### **2.3. Marco Teórico.**

#### **2.3.1 Hidroelectricidad.**

Es la energía que posee el agua cuando se transporta a través de un cauce o cuando se encuentra empozada (energía potencial) a cierta altura, donde se deja caer para producir energía eléctrica. Esta fuente de energía renovable es utilizada mayormente en zonas que presentan grandes cantidades de agua; su mayor utilización son las centrales hidroeléctricas, las cuales varían de acuerdo a las condiciones del entorno (UPME et. al, 2015).

### **2.3.2 Turbinas hidráulicas.**

Aprovechan la energía cinética y potencial que contiene el agua, provocando un movimiento rotatorio el cual, mediante un generador, produce energía eléctrica. Las turbinas hidráulicas se dividen en dos conceptos: turbinas de acción y turbinas de reacción (Martín & Infante, 2021).

### **2.3.3 Turbinas de acción.**

Son aquellas que usan solamente la velocidad del agua para girar. El tipo de turbina más usada viene a ser la turbina Pelton, aunque existen otros como la turbina de flujo cruzado, o también conocida como la turbina Ossberger o Banki-Michell (Martín & Infante, 2021).

- **Turbinas Pelton.**

Son turbinas tangenciales que requieren grandes saltos y pequeños, usados comúnmente en proyectos de generación distribuida. A pesar de ser una tecnología con más de 100 años de utilidad, existen pocas metodologías para el diseño de turbinas Pelton (Ceballos Zuluaga et al., 2023).

Está determinado por un rodete móvil con álabes de doble cuenco. Al momento de ingresar el fluido a la turbina, es regulada por medio de inyectores, chocando con los álabes y causando el movimiento rotatorio de las turbinas, en donde los inyectores controlan la potencia que se genera al momento de aumentar o disminuir el caudal del agua.

- **Turbinas de flujo cruzado.**

Está constituida por un inyector provisto de un álabe, el cual regula y orienta el caudal que ingresa a la turbina. El primer impulso se genera cuando el caudal ingreso a la turbina hacia las palas del rodete. Cuando el caudal atraviesa el interior del rodete, se genera el segundo impulso al momento de salir y caer por el tubo de aspiración. Poseen un campo de aplicación muy amplio,

pudiendo instalar en aprovechamientos con saltos entre 1 a 200 metros, con un rango de variación de caudales altos (Martín & Infante, 2021).

La instalación de esta tecnología se puede realizar sin un previo estudio del sector, en áreas con canales de riego, molinos de agua, plantas de tratamiento de agua, entre otros. Requieren una menor inversión inicial en comparación a otras tecnologías hidroeléctricas de una capacidad similar, y produce un menor impacto ambiental. La eficiencia máxima está entre 5% a 10% menor que la turbina Pelton, pero garantiza una curva de eficiencia casi lineal para un mayor rango de flujo (Mereke et al., 2024).

#### **2.3.4 Turbinas de reacción.**

Este tipo de turbina consiste en el diseño de un rotor, la cual aprovecha la presión restante en el agua al momento de entrar para convertir en energía cinética. Esto logra que el agua, al momento de salir de la turbina, se logre una presión menor a la presión atmosférica (Martín & Infante, 2021).

- **Turbinas Francis.**

Es la turbina comúnmente utilizada en el ámbito hidroeléctrico, siendo la precursora de las turbinas de reacción con mayor eficiencia. Su componente que le genera mayor admiración es el rodete, la cual recibe el fluido de manera óptima, logrando un mejor aprovechamiento de energía, mayor eficiencia de transferencia de energía y optimización del rendimiento del sistema. El fluido es conducido hacia una salida de agua del rodete, permitiendo el uso de un tubo de aspiración, el cual requiere un diseño sencillo (Serna-Perales, 2023).

- **Turbinas Kaplan.**

Este tipo de turbinas son variantes de las turbinas con hélice, el cual consiste de una cámara de entrada, un distribuidor fijo, rodete con palas fijas en forma de hélice de barco y un tubo de

aspiración. Incorporan un distribuidor regulable, generando mayor funcionamiento con mejores rendimientos, a cambio de ser de mayor complejidad y de costo elevado. Se aplica en saltos pequeños con caudales variables o grandes (Martín & Infante, 2021).

Se suelen utilizar para caídas máximas alrededor de 80 metros, denominados como pequeños saltos de agua, pero debido a que sus velocidades abarcan entre 300 y 850 revoluciones por minuto (rpm), se requieren caudales grandes. Son capaces de trabajar con rendimientos de hasta el 90% en un rango amplio de caudales, por lo cual se construyen estas turbinas con doble regulación y álabes móviles, tanto en el rodete como en el distribuidor (Combarro Marina, 2022).

### **2.3.5 Energías Renovables**

Las fuentes de energía renovables suponen una fuente de energía inagotable, la cual se puede aprovechar para un futuro cercano. Se obtienen de forma continua mediante los recursos naturales existentes, siendo agotables para uso humano, y las cuales se puede recurrir permanentemente debido a que se renuevan de forma continua, siendo diferentes a las energías generadas por combustibles fósiles, existiendo en cantidades fijas y agotables con el paso del tiempo (Gavilánez et al., 2020).

Las formas principales de energías renovables llegan a ser: la biomasa, hidráulica, eólica, solar, geotérmica y las energías marinas. Proviene del Sol, ya sea de manera directa o indirecta, siendo excepción la energía geotérmica y la energía marina. En la actualidad, las energías renovables, a nivel mundial, aportan en un 8% con respecto al consumo de energía y, solo en el continente europeo, contribuye con un 6%; los porcentajes corresponden a las energías hidráulicas y biomasa (IRENA, 2017).

En el Ecuador, en el año 2023, el 94.45% de la producción bruta de energía es generado por fuentes renovables, siendo el 78.58% de energía hidráulica y el 15.87% perteneciente a la energía térmica (CENACE, 2023).

### ***Energía eólica***

La energía eólica utiliza los conceptos de la energía cinética proveniente del viento y la convierte en energía eléctrica mediante el uso de aerogeneradores, utilizando una hélice que transmite el movimiento del viento en sus palas al rotor de un alternador. Si el objetivo es el suministro de electricidad a ciertos puntos de consumo aislados, tales como viviendas dispersas, y labores agrícolas, se utilizan equipos de pequeña potencia (Espejo Marín, 2004).

La ecuación en que se basa la generación de energía eólica es la siguiente:

#### **Ecuación 2. Potencia de la turbina eólica.**

$$Pot = A_R * c_p * p$$

En donde:

**Pot:** Potencia de turbina eólica;

**$A_R$ :** Superficie del rotor (m<sup>2</sup>);

**$c_p$ :** coeficiente de potencia;

**$p$ :** densidad de potencia (W/m<sup>2</sup>).

El coeficiente de potencia que se considera para la turbina eólica varía entre valores de 0.4 y 0.5, dependiendo de la turbina. Este coeficiente indica la relación de la potencia del viento utilizada con respecto a la velocidad del viento entrante; corresponde con el rendimiento de la turbina eólica.

Sin embargo, para determinar la potencia que se genera mediante los aerogeneradores, se debe determinar la densidad de potencia del viento (G.U.N.T. Gerätebau, 2024).

La densidad de potencia eólica se determina como la energía cinética del viento que circula en una unidad de área, la cual se encuentra transversal a la velocidad. Se combina la distribución de la velocidad del viento con la densidad del área, haciendo que la densidad de potencia del viento proporciona una estimación de la potencia que se produce con la energía eólica. Se debe tomar en cuenta que el cálculo de densidad de potencia no es exacto, debido a que se ignoran las variaciones de la velocidad del viento entre las medidas que se toman (González Sánchez, 2021).

Realmente, la densidad de potencia es un poco mayor que la calculada con la siguiente fórmula:

### **Ecuación 3. Densidad de potencia de energía eólica.**

$$p = \frac{1}{2} * \rho_w * v_w^3$$

En donde se consideran los siguientes factores:

**p:** Densidad de potencia eólica (W/m<sup>2</sup>)

**$\rho_w$ :** Densidad del viento (1.2 kgf/m<sup>3</sup>);

**$v_w$ :** Velocidad del viento (m/s).

### ***Energía solar***

La energía solar se define como el aprovechamiento de la radiación electromagnética que emite el Sol. El calor y luz del Sol llegan a ser aprovechadas por diversos receptores como son las células fotovoltaicas, heliostatos o colectores térmicos, logrando la transformación en energía eléctrica o

térmica. El aprovechamiento de energía solar se determina mediante dos formas de tecnologías solares (C. et al., 2015):

- Energía solar pasiva;
- Energía solar activa (dividiéndose en térmica y fotovoltaica).

### ***Energía Solar Pasiva***

Consiste en aprovechar la energía solar de forma directa sin tener que transformar en otro tipo de energía, para llevar a cabo su uso inmediato o para almacenar sin sistemas mecánicos o aportes externos. La tecnología solar pasiva incluye sistemas de ganancia directa e indirecta para calentar espacios, uso de masa térmica y materiales para suavizar las oscilaciones de la temperatura del aire, chimeneas y el calor de la tierra (C. et al., 2015).

### ***Energía Solar Térmica Activa***

Se trata en aprovechar la energía que procede del sol a través de la concentración y transformación en calor, y llegar hasta la generación de energía eléctrica. Se aprovecha el calor para la cocción de alimentos, producción de agua caliente, o para producir energía mecánica y luego transformar en energía eléctrica a través de sistemas termosolares de concentración (C. et al., 2015).

La captación del calor se realiza mediante colectores, las cuales se clasifican a continuación:

- De baja temperatura, menor a 100°C para calentamiento de piscinas, calentamiento de agua para baños, etc.
- De media temperatura, entre 100 y 250°C. Se aplican los concentradores estacionarios y canales parabólicos.

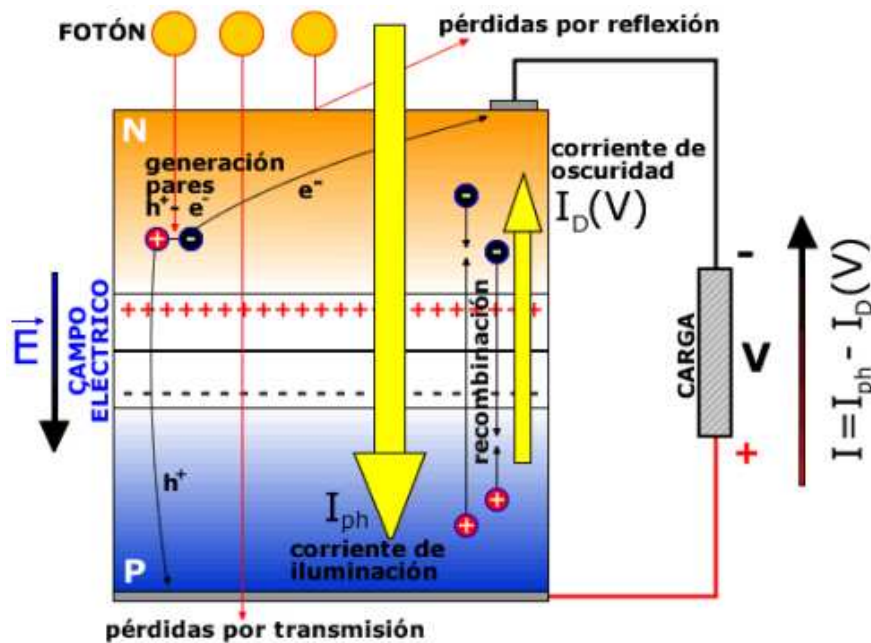
- De alta temperatura, mayor a 500°C, usado para la generación de electricidad. Existen tres tipos principales: plato parabólico, canal parabólico y sistemas de torre central.

Debido a que los paneles solares ya vienen prefabricados, se deberá definir la cantidad de paneles solares a colocar para que genere la cantidad de energía requerida para potenciar las bombas hidráulicas.

### ***Energía Solar Fotovoltaica***

Se trata de la conversión de la radiación que emite el Sol en electricidad de forma directa, la cual se realiza mediante módulos o generadores fotovoltaicos. La conversión fotovoltaica ocurre sin necesidad de ciclos térmicos, cambios químicos o procesos mecánicos que requieran partes móviles. La conversión se realiza en las células solares que aprovechan las propiedades de los materiales usados como semiconductores. Los semiconductores son sólidos que permiten la circulación de corriente bajo ciertas condiciones.

**Figura 10.** *Funcionamiento de la célula solar.*



**Fuente:** (Rojas Muñoz, 2017).

Cuando un fotón (partícula de luz) incide sobre una célula solar, se puede reflejar, transmitir o absorber cediendo su energía a un electrón del material. El electrón con excesos de energía podrá moverse por el material semiconductor hasta alcanzar el contacto. El resultado de este es la generación por la luz de una corriente eléctrica (C. et al., 2015).

Para determinar la potencia fotovoltaica que se produce, se realiza con la siguiente fórmula:

**Ecuación 4. Potencia fotovoltaica generada.**

$$PFV = \frac{CD}{HSP * \eta}$$

En donde se considera lo siguiente:

**PFV:** Potencia fotovoltaica (W/día);

**CD:** Consumo diario (Wh);

**HSP:** Horas Solares Pico (hr);

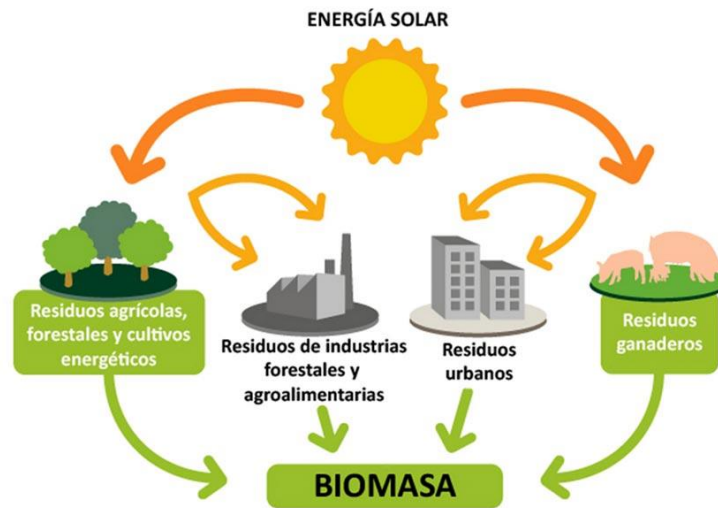
**$\eta$ :** Eficiencia del sistema (77%).

### ***Energía de biomasa***

La biomasa abarca los conjuntos heterogéneos de materias orgánicas, ya sea por su origen como por su naturaleza. Este se emplea para servir como una fuente de energía renovable basándose de utilizar materia orgánica formada por medios biológicos de un pasado inmediato o derivados de esto. También se considera la biomasa como la materia orgánica de aguas residuales y lodos extraídos de depuradores, así como la parte orgánica de residuos sólidos urbanos. Es posible su uso para energía renovable debido a que se utiliza la energía solar fijada por los vegetales en el

proceso fotosintético. La energía es liberada al momento de romper los enlaces de compuestos orgánicos al realizar la combustión, dando como resultado dióxido de carbono y agua (Fernández, 2004).

**Figura 11.** Elementos considerados para la generación de biomasa.



**Fuente:** (Erbia Energy, 2020)

Los productos que provienen de la biomasa que se utilizan para la producción de energía se les conocen como biocombustibles, las cuales se clasifican según su estado físico: sólidos haciendo referencia a los que se emplean para elementos térmicos y eléctricos, y líquidos siendo útil como biocarburantes para la automoción (Fernández, 2004).

La biomasa es una buena alternativa energética por dos motivos: la primera siendo que, a partir de ella, se puede obtener una gran diversidad de productos; y segundo, es adaptable a los campos que se aplican a los combustibles tradicionales. A través de técnicas específicas, se obtiene una

serie de combustibles en estado sólido, líquido y gaseoso aplicables para cubrir las necesidades de transporte, industria y electricidad, o llegar a ser útil como materia prima (Fernández, 2004).

## CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Factores en el estudio

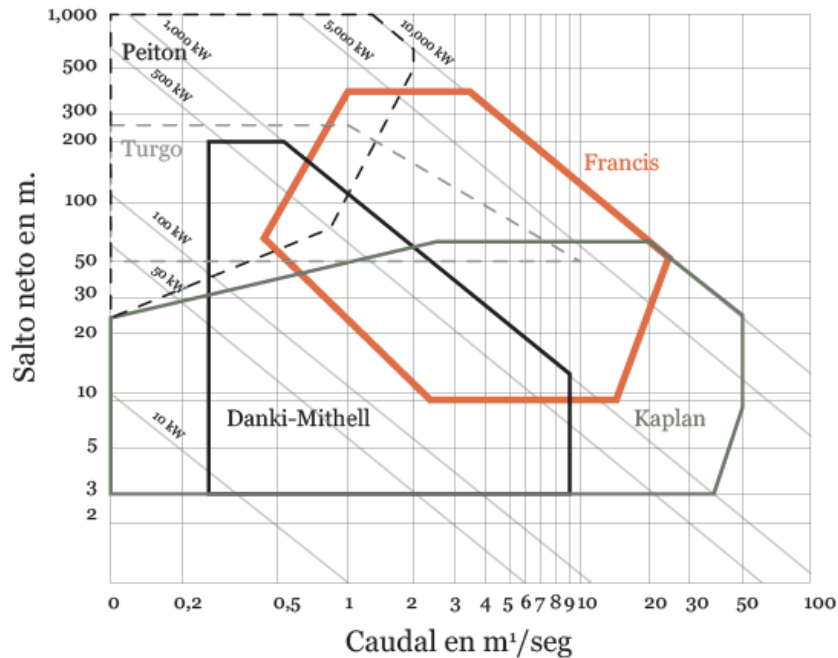
En el análisis de generación de estaciones de bombeo para el proyecto de riego Minas – Ludo, se deben abordar los factores relacionados para entender el motivo de la investigación. Los factores de mayor importancia para llevar a cabo el proyecto de investigación se desglosan a continuación:

**Topografía del sector:** Es un factor crítico que influye a lo largo del proyecto. Se debe considerar la topografía, tomando en cuenta pendientes y altitudes, lo cual afecta el caudal en que el agua viaja por las líneas de conducciones y en la potencia suministrada y generada por las turbinas hidráulicas. En caso que se requiera, se deberá realizar cortes al terreno para que, al momento de determinar la ubicación de las estaciones de bombeo, no alcance la cota de llegada requerida.

**Estaciones de bombeo:** De vital importancia para la investigación planteada, ya que su función principal es el movimiento de fluidos desde un punto a otro, especialmente colocada en circunstancias donde la gravedad no proporciona fuerza suficiente para flujo requerido. Su diseño dependerá del caudal la cual circule por las tuberías antes de su llegada a la bomba hidráulica, y también la diferencia de alturas hacia el punto de llegada del fluido.

**Turbinas hidráulicas:** Este factor comprende la generación de energía eléctrica mediante la energía que produce el agua al circular por las tuberías. Se debe considerar la turbina adecuada según el salto hidráulico, el caudal que pasará por la turbina, y el rendimiento del generador utilizado en la turbina para la generación de energía eléctrica. La selección de turbina se debe realizar, a su vez, en función de la velocidad operativa que se desea obtener del generador, siendo una medida de desempeño de cada turbina. En la siguiente figura se presenta el rango de aplicación de los diversos tipos de turbina, en función de la caída de agua y del caudal aprovechable, correspondiendo a las pequeñas centrales hidroeléctricas.

**Figura 12.** Rango de aplicación de turbinas hidráulicas.



**Fuente:** (Romero-Hernandez et al., 2011).

**Allievi:** Allievi es un programa desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, que genera condiciones para el análisis y verificación de los efectos de maniobras realizadas sobre elementos de sistemas hidráulicos. Permite analizar el flujo de agua en redes de tuberías alimentadas por varios embalses, con varias estaciones de bombeo, formando redes ramificadas; la cual es reconocida por la precisión de los resultados que genera (Santana, 2018).

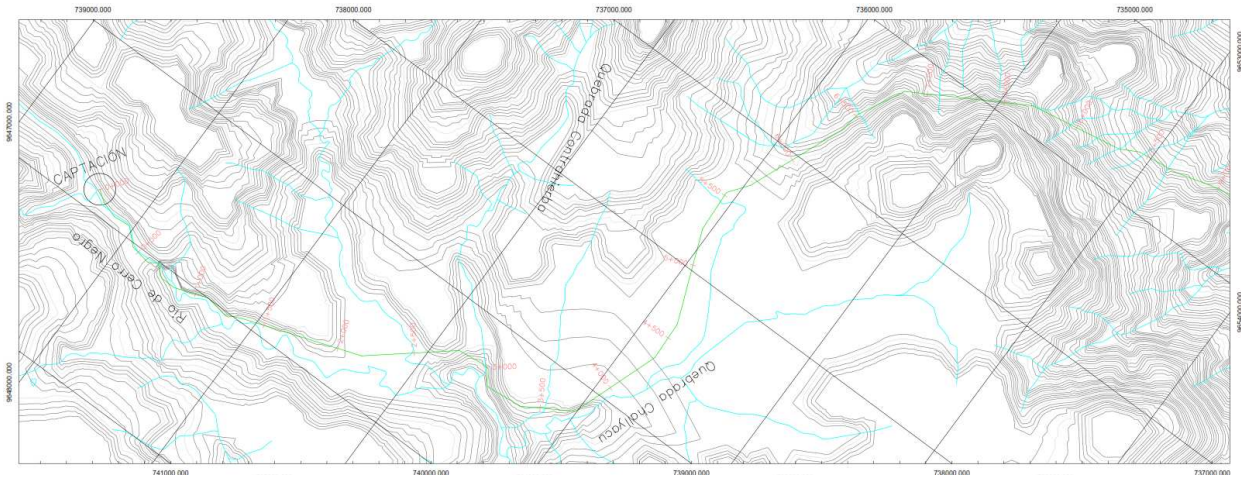
La implementación del software Allievi desempeña un rol importante, permitiendo un mejor análisis de datos y la toma de decisiones. Se deben detallar los datos de entrada y la generación de informes e interpretación de resultados, las cuales serán primordiales para el análisis de la implementación de estaciones de bombeo para el impulso del agua.

## 3.2. Recopilación de datos.

### 3.2.1 Topografía de área de conducción

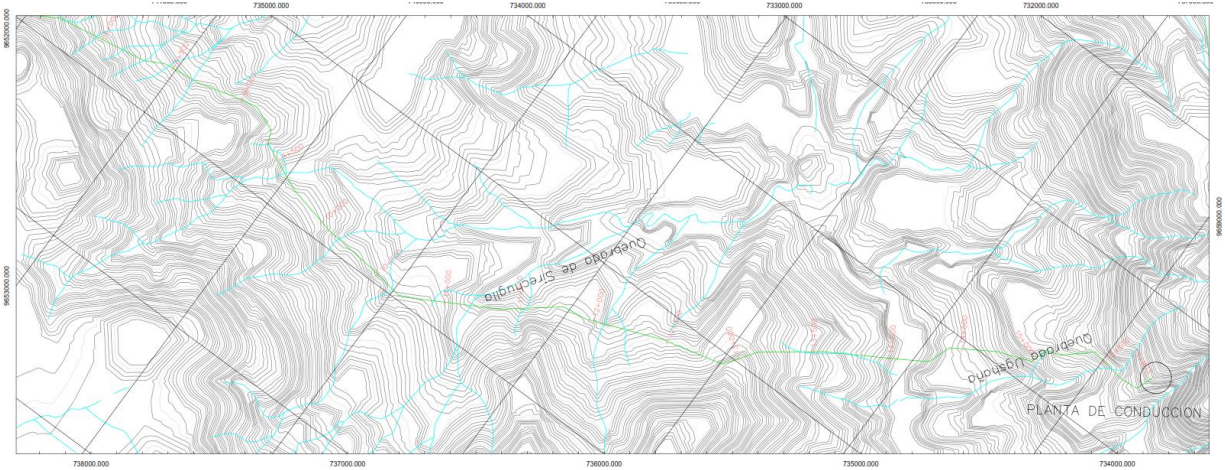
Debido a que el proyecto “Sistema de Riego Río Minas Ludo” fue realizado por la entidad ejecutora Gobierno Autónomo Descentralizado del Azuay (GAD Azuay), no fue necesario la recolección de datos in situ. El Gobierno Autónomo Descentralizado del Azuay compartió los planos topográficos del sistema de riego para su posterior interpretación. A continuación, se presentan los planos topográficos de la conducción del sistema de riego Minas Ludo.

**Figura 13.** Planta de conducción del sistema de riego Minas Ludo, abscisa 0+000–9+000.



*Nota:* Para mejor visualización de la figura, revisar Anexo 1.

**Figura 14.** Planta de conducción del sistema de riego Minas Ludo, abscisa 9+000-15+903.



*Nota:* Para mejor visualización de la figura, revisar Anexo 1.

La información topográfica mostrada anteriormente corresponde a la planta de la conducción del sistema de riego Minas Ludo, el cual parte de la captación construida en el río Minas en la abscisa 0+000, hasta la planta de tratamiento que sirve al centro parroquial de Ludo, en la abscisa 15+903.

### 3.2.2 Mapa de pendientes

Como la zona de estudio se encuentra en una zona de niveles de pendiente variados, esto altera la velocidad en que viaja el agua a través de las líneas de conducción. La línea de conducción que consiste desde la captación del río Minas hasta la planta de tratamiento perteneciente a la parroquia Ludo, en donde se realiza el detallado de acuerdo a las pendientes naturales del terreno y la colocación de la línea de conducción del proyecto. Se realiza una tabla para resumir la información proveniente de los perfiles de las líneas de conducción desde la captación hasta la planta de tratamiento de agua potable en Ludo, tales como válvulas y otros accesorios dentro de la línea de conducción.

**Tabla 7.** *Análisis de caídas de agua y velocidad en tuberías desde captación hasta la planta de tratamiento.*

<b>Abscisas</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Altura de caída máxima (m)</b>
<b>0+000 – 1+000</b>	0.73	45.041
<b>1+000 – 2+000</b>	1.96	9.143
<b>2+000 – 3+000</b>	1.96	37.024
<b>3+000 – 4+000</b>	1.96	9.581
<b>4+000 – 5+000</b>	1.96	0.049
<b>5+000 – 6+000</b>	1.96	21.013
<b>6+000 – 7+000</b>	1.96	44.29
<b>7+000 – 8+000</b>	1.96	96.617
<b>8+000 – 9+000</b>	1.96	95.27
<b>9+000 – 10+000</b>	1.96	84.066
<b>10+000 – 11+000</b>	1.96	54.209
<b>11+000 – 12+000</b>	1.96	41.721
<b>12+000 – 13+000</b>	1.96	14.347
<b>13+000 – 14+000</b>	1.96	241.531
<b>14+000 – 15+000</b>	1.96	16.827
<b>15+000 – 15+903</b>	1.96	8.326

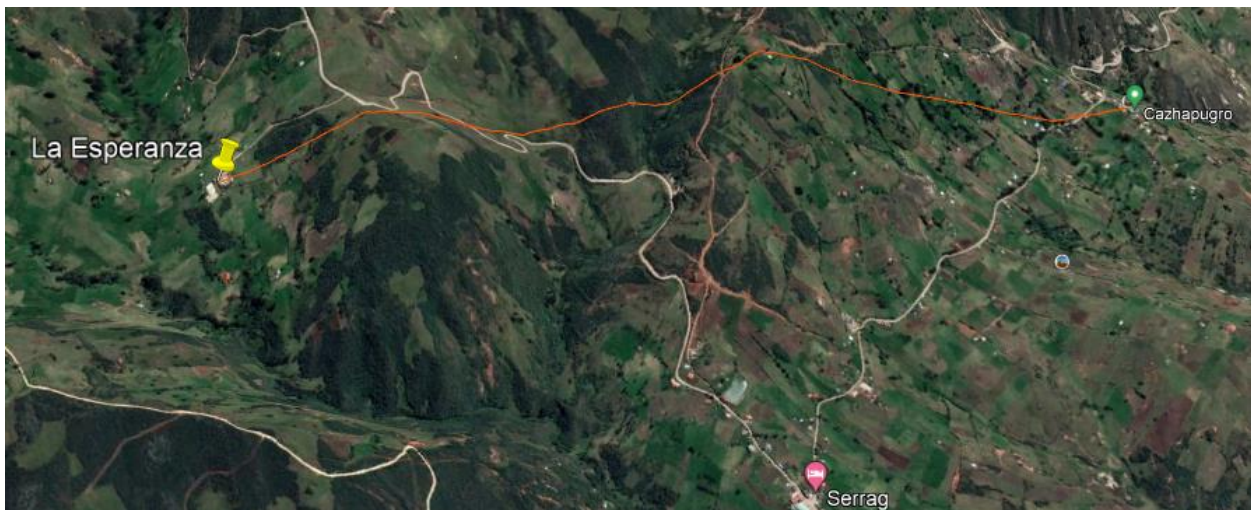
*Nota:* Para visualizar de dónde se obtienen los datos, revisar en Anexos 3 – 19.

**Fuente:** Autoría propia.

### 3.2.3 Topografía de áreas de conducción a analizar

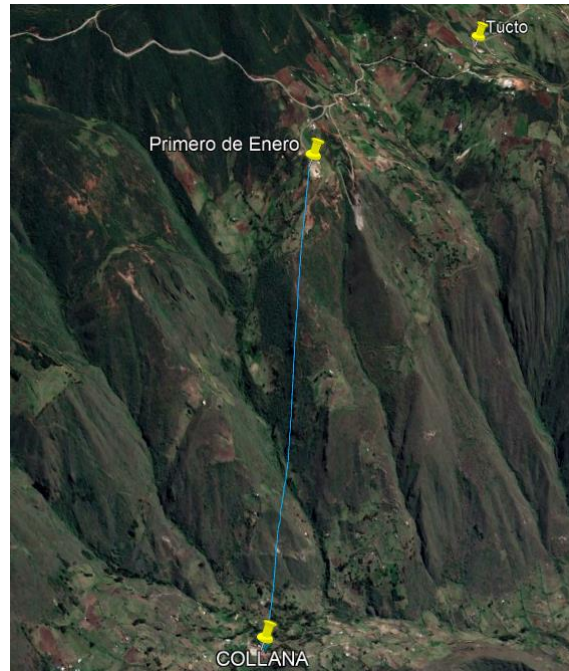
Los Anexos 3 – 19 corresponden únicamente a la línea de conducción que une la captación del río Minas y la planta de tratamiento de la parroquia Ludo, siendo de menor utilidad al proyecto de investigación. Debido a que la investigación se trata del análisis de las comunidades de Cahzapugro y Collana hasta las comunidades de Primero de Enero, La Esperanza y Tucto, se realiza un mayor énfasis a lo requerido del proyecto, como son los datos topográficos. No se posee esta información medida con instrumentos topográficos, por la cual se tomarán los perfiles de elevación mediante el programa Google Earth, trazando una ruta entre las comunidades a evaluar.

**Figura 15.** *Trazado de ruta Cahzapugro - La Esperanza.*



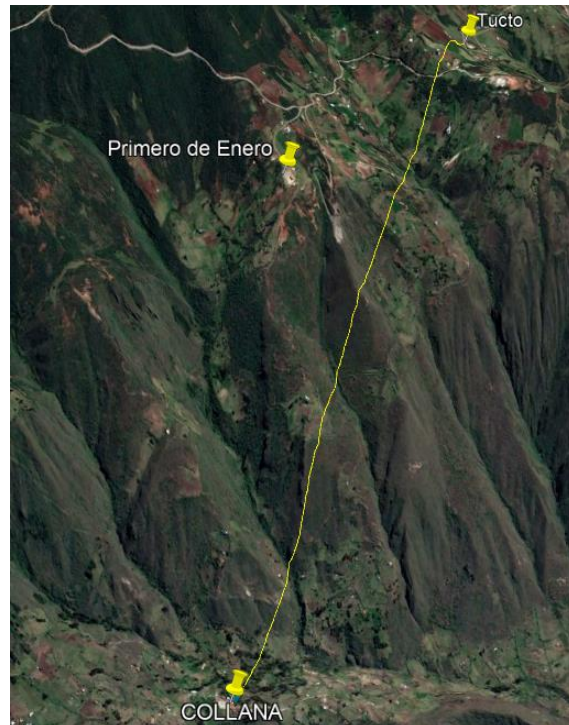
**Fuente:** Google Earth.

**Figura 16.** *Trazado de ruta Collana - Primero de Enero.*



**Fuente:** Google Earth.

**Figura 17.** *Trazado de ruta Collana - Tucto.*



**Fuente:** Google Earth.

Teniendo en cuenta la topografía existente entre las comunidades, se procede a realizar el análisis de las estaciones de bombeo que serían de utilidad para la llegada de agua potable hacia las comunidades de mayor elevación.

### **3.3. Cálculo de generación de energía eléctrica**

Para la generación de energía eléctrica que produce las conducciones de agua, se debe considerar la energía potencial que existe al momento de circular el agua por las líneas de conducción. Debido a que las líneas de conducción se encuentran en pendiente, la ecuación de la energía potencial del agua a aplicar será la siguiente:

**Ecuación 5.** *Energía potencial.*

$$W_{P_{H_2O}} = \Delta E_P = m * g * \Delta h$$

En donde:

**$W_{P_{H_2O}}$** : Trabajo generado (*J*);

**$E_P$** : Energía potencial (*J*);

**$m$** : Masa del agua (*kg*);

**$g$** : Fuerza de gravedad (*9.81 m/s<sup>2</sup>*);

**$\Delta h$** : Variación de alturas entre puntos a analizar (*m*).

Debido a que la energía potencial es la capacidad del fluido en realizar un trabajo en función de la altura que se encuentra, se considera la energía potencial del agua como el trabajo realizado en la línea de conducción. Para convertir la energía potencial en energía eléctrica, se divide el

trabajo realizado por el agua en un intervalo de tiempo, para determinar la potencia generada por el corriente de agua.

**Ecuación 6.** *Potencia generada por líneas de conducción.*

$$P_{H2O} = \frac{W_{P_{H2O}}}{t}$$

En donde:

$P_{H2O}$ : Potencia generado por corriente de agua ( $W$ );

$W_{P_{H2O}}$ : Trabajo generado ( $J$ );

$t$ : Tiempo de análisis de caudal ( $s$ ).

De esta manera se encuentra la energía eléctrica que puede ser generado a través de los datos hidráulicos proporcionados. Pero, las turbinas hidráulicas no trabajan con un rendimiento del 100% de lo esperado, sino que, a valores menores de rendimiento, el cual afecta a la energía eléctrica generado al momento de salir de la turbina. Esto indica que la potencia que genera el agua al momento de entrar a la turbina hidráulica no será la misma que egresa de la turbina.

Para determinar la potencia que egresa de la turbina hidráulica y que ingresa a la bomba, se determina el rendimiento según el tipo de turbina hidráulica, y con la aplicación de la siguiente ecuación:

**Ecuación 7. Rendimiento de la turbina.**

$$\eta = \frac{P_{Tur}}{P_{H2O}}$$

En donde:

$\eta$ : Rendimiento óptimo de turbina (%);

$P_{Tur}$ : Potencia que egresa de turbina ( $W$ );

$P_{H2O}$ : Potencia generado por corriente de agua ( $W$ ).

### 3.4. Potencias requeridas en las bombas

Para determinar la potencia que requiere una bomba hidráulica para transportar el líquido vital desde un punto hacia otro punto de mayor altitud, se requiere un análisis de la siguiente ecuación:

#### Ecuación 8. Potencia real de una bomba.

$$Pot = \frac{Q * \Delta h * \gamma}{\eta}$$

En donde:

**Pot:** Potencia requerida ( $W$ );

**Q:** Caudal que ingresa a la bomba ( $m^3/s$ );

**$\Delta h$ :** Variación de alturas entre puntos a analizar ( $m$ ),

**$\gamma$ :** Peso específico del agua ( $1000 \text{ kg}/m^3$ )

**$\eta$ :** Rendimiento de la bomba (%)

Debido a que se presentan pérdidas internas y externas en las bombas a causa de temas hidráulicos y mecánicos, se considera un rendimiento que compensa todas las pérdidas. La relación de la potencia que egresa e ingresa respectivamente de la bomba se considera como el porcentaje de rendimiento, el cual también se puede obtener a través de catálogos de bombas comerciales.

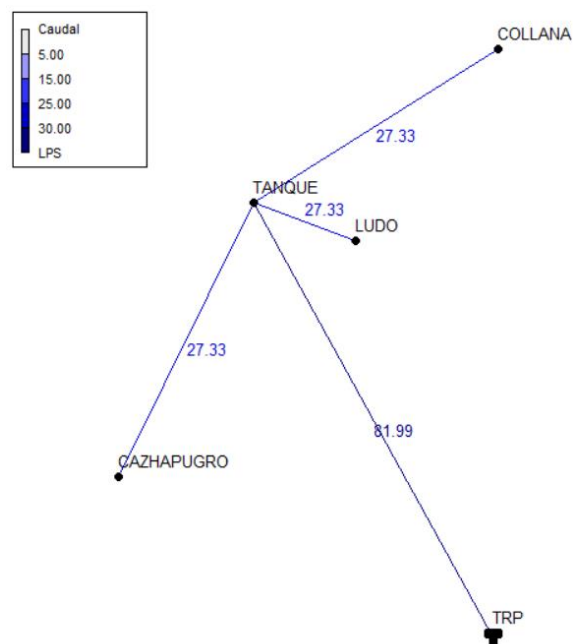
## CAPITULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. Análisis de conducción del proyecto

La autorización de uso de agua otorgado por la Secretaría del Agua (SENAGUA) es de 187 litros por segundo (l/s), sin embargo, debido a las dificultades de la topografía del sector, se utilizó una captación de 82 l/s ya que, al conducir un mayor caudal, el proyecto se vuelve muy costoso y, por ende, no ejecutable.

Este caudal de 82 l/s se distribuye desde la captación localizada en el río Minas hacia la planta de tratamiento de agua potable en la parroquia Ludo, en donde se encuentra un tanque de equirrepartición, distribuyendo el caudal para 3 regiones: Ludo Centro, la comunidad de Collana, y la comunidad de Cazahapugro; siendo que el caudal se distribuye igual en 3 partes, el cual se consta en la siguiente figura la distribución de caudal.

**Figura 18.** *Distribución de caudal hacia comunidades.*



**Fuente:** Autoría propia.

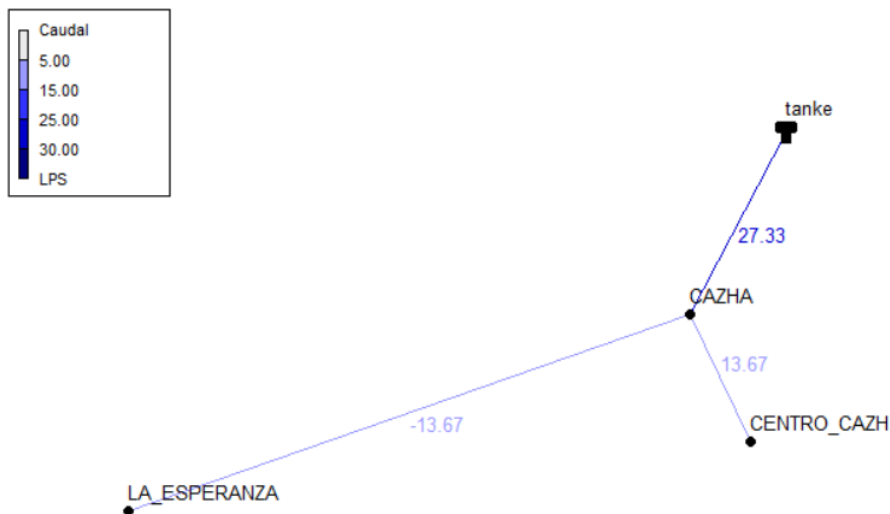
La red de distribución de caudales presentado corresponde a lo que ya se encuentra in situ, realizado por el Gobierno Provincial del Azuay (GPA) en el año 2023, por lo que los datos de caudales y cotas fueron obtenidos por la misma entidad.

Aparte de la distribución de caudal que se realiza hacia las comunidades de Collana y Cahzapugro, se debe distribuir de igual manera el caudal hacia las comunidades de Tucto, La Esperanza, y Primero de Enero, tomando en cuenta una reserva de caudal hacia las comunidades donde ya se dispone la red de tuberías del proyecto de riego, es decir, del caudal que ingresa a las comunidades de Collana y Cahzapugro, distribuir el caudal hacia dos puntos de destino: las comunidades que se encuentran a mayor altura y al tanque de reserva para la población.

#### 4.1.1 Conducción Cahzapugro – La Esperanza

Dicho lo anterior, se procede a analizar el caudal que ingresa a la comunidad de Cahzapugro, para su posterior reserva y distribución hacia la comunidad de La Esperanza. Así planteado en el punto 4.1, se ejecuta el análisis de distribución de caudales mediante el programa EPANET.

**Figura 19.** *Distribución de caudales Cahzapugro - La Esperanza.*



**Fuente:** Autoría propia.

Por ende, el caudal a analizar para las estaciones de bombeo hacia la comunidad La Esperanza será de 13.67 l/s. Se debe tomar en cuenta la topografía de la ruta para determinar la altura máxima entre en las cotas para la potencia requerida de la bomba.

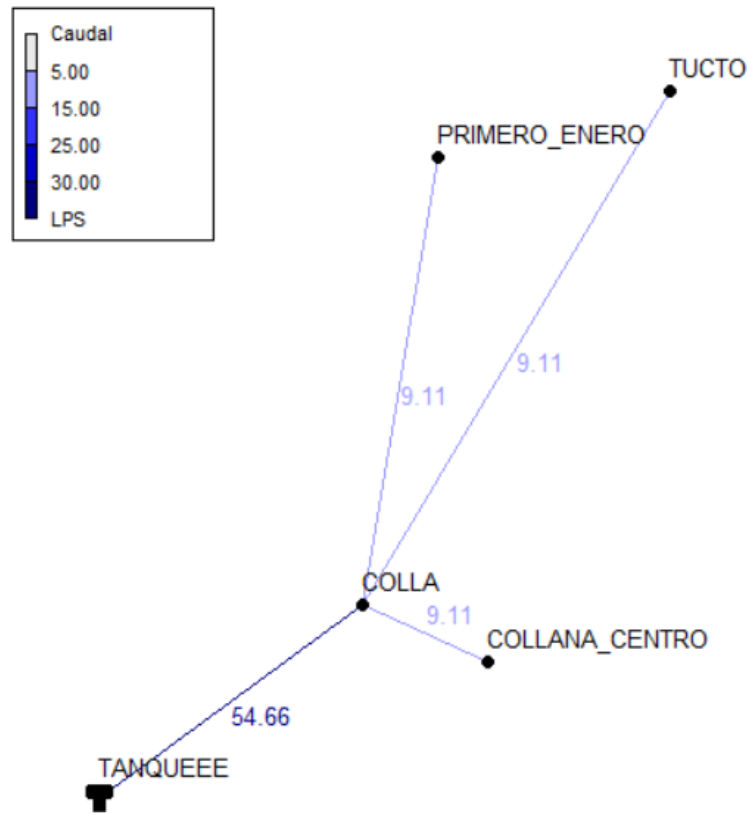
#### **4.1.2 Conducción Collana – Tucto – Primero de Enero**

Para el tramo de Collana hacia las comunidades de Tucto y Primero de Enero, existen 2 alternativas para las rutas de llegada de agua potable, debido a que Tucto y Primero de Enero no se encuentran muy alejadas, con una longitud de 1391 metros. Las alternativas a evaluar son las siguientes, según su distribución de caudal.

- ***Tramos separados Collana – Tucto, Collana – Primero de Enero***

Para la primera alternativa, se analizó la toma de rutas por separado, es decir, de Collana saldrán 2 extensiones de tuberías, uno hacia la comunidad de Tucto, y otro hacia la comunidad de Primero de Enero, tomando en cuenta un caudal de reserva para Collana. La distribución de caudales quedaría de la siguiente manera:

**Figura 20.** Distribución de caudales para primera alternativa.



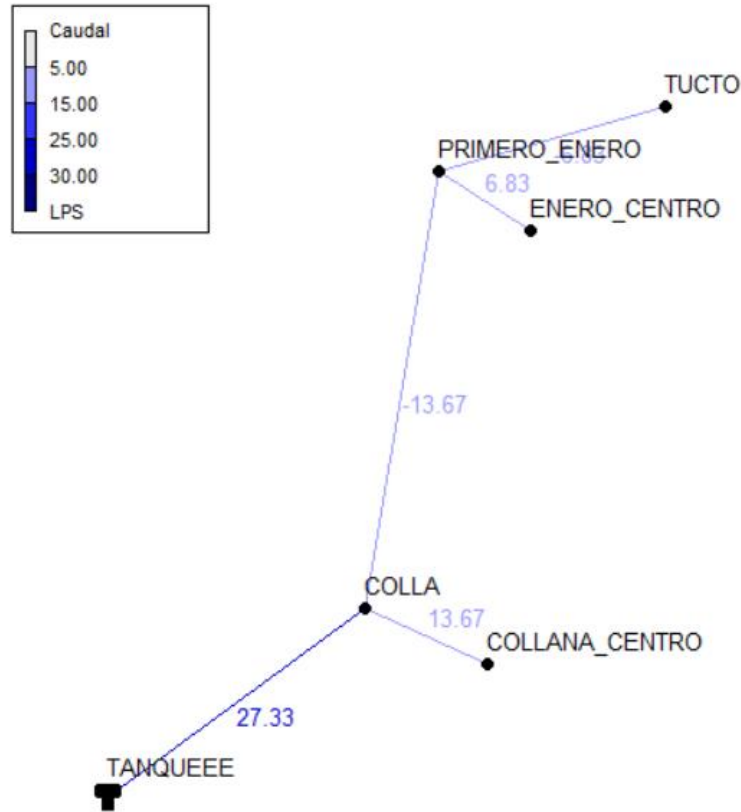
**Fuente:** Autoría propia.

Por ende, el caudal que se distribuye hacia las comunidades de Tucto y Primero de Enero es de 9.11 l/s, el cual se pondrá de análisis con respecto a la otra alternativa para ver cuál resulta beneficioso para las poblaciones.

- ***Unión tramo Tucto – Primero de Enero.***

Para la segunda alternativa, se considera la unión de una tubería que surge desde la comunidad Primero de Enero hacia Tucto, siempre considerando un caudal para reserva de agua en la comunidad de Collana y Primero de Enero. Por ende, se realiza el siguiente análisis para la distribución de caudales para esta alternativa.

**Figura 21.** Distribución de caudales para segunda alternativa.



**Fuente:** Autoría propia.

Como se puede observar, el caudal que estaría ingresando a los centros comunitarios de Primero de Enero y de Tucto sería de 6.83 l/s, generando un menor caudal de entrada, por lo que se opta por la primera alternativa para la red de distribución de flujo.

### 4.1.3 Longitudes de salto a evaluar

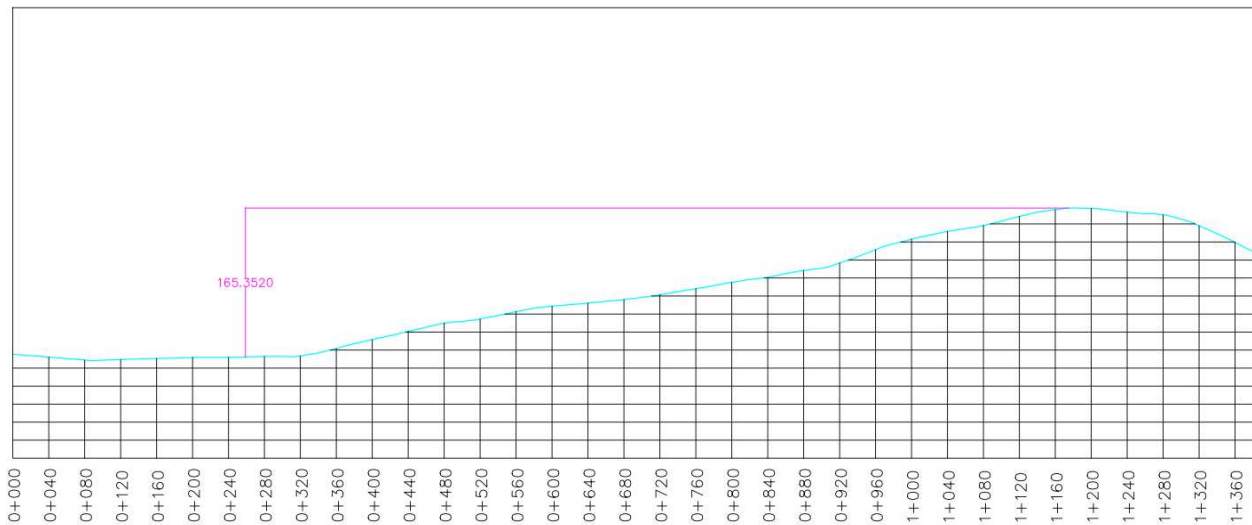
Una vez que se han determinado los caudales de las rutas a analizar, también se debe examinar las longitudes de salto que se presentan entre los tramos. Para las consideraciones de longitud de salto, se plantea la diferencia de cotas que existe entre dos puntos con un solo pendiente, en caso de que exista un cambio de pendientes o un lugar de superficie plana, se considera como otra

longitud de salto para su debido análisis. Se aplica como herramienta Google Earth para la evaluación de las pendientes existentes entre los tramos.

### ***Tramo Cahzapugro – La Esperanza***

Para el tramo a evaluar entre las comunidades de Cahzapugro y La Esperanza, se debe analizar el perfil de elevación para determinar la longitud de salto más crítico existente en la ruta de estudio. Con Google Earth y el tramo ya dibujado, se evalúa el siguiente perfil de elevación que existe entre las dos comunidades:

**Figura 22.** Perfil de elevación entre las comunidades de Cahzapugro y La Esperanza.



**Fuente:** Autoría propia.

Las abscisas donde mayor longitud de salto se presenta es entre la abscisa 0+258 y la abscisa 1+174, la cual será de análisis para la determinación de turbina a aplicar en las redes de tuberías. Para determinar el valor de la longitud de salto, se analizan las cotas de las abscisas de mayor longitud de salto, y se realiza una diferencia de cotas para determinar la altura de salto neto.

**Tabla 8.** *Abscisas y cotas de zona con mayor altura de salto en tramo Cahzapugro – La Esperanza.*

<b>Abscisa</b>	<b>Cota</b>
0+258	2712.294
1+174	2877.646

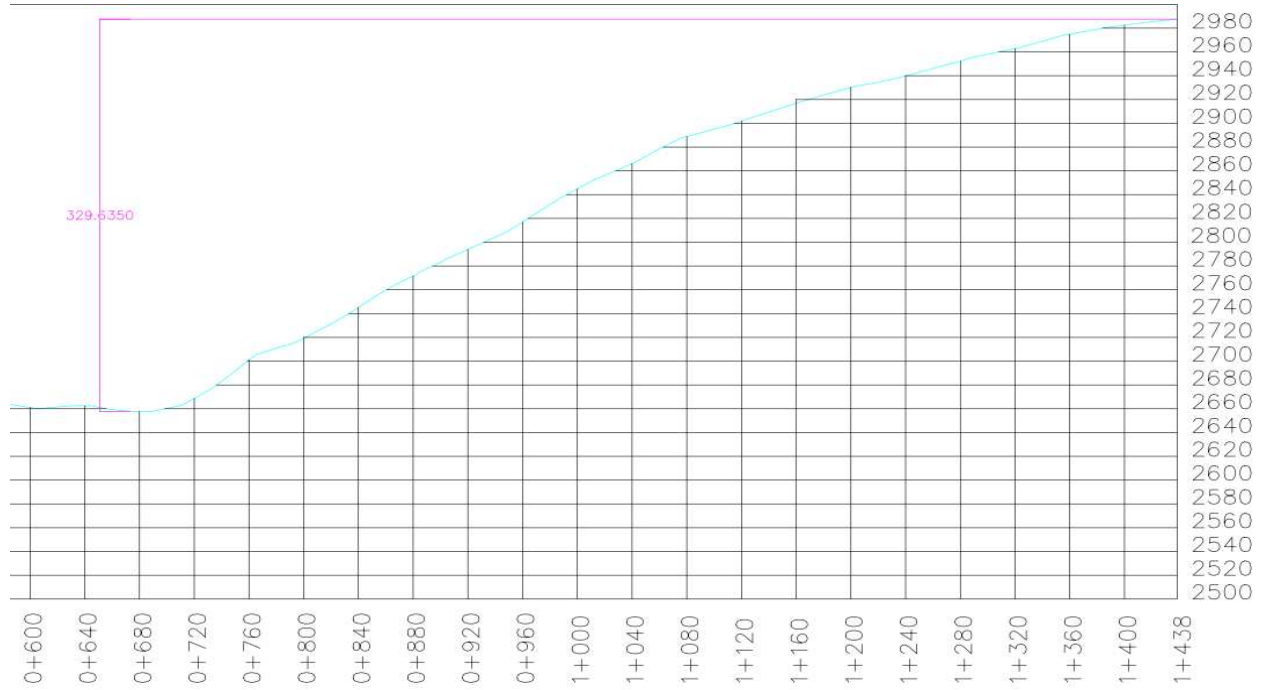
**Fuente:** Autoría propia.

Al realizar la diferencia entre cotas, se determina que la altura de salto a determinar para la selección de turbina en este tramo será de 165.352 metros.

#### ***Tramo Collana – Primero de Enero***

Se realiza de igual forma en análisis del perfil de elevación que existe al momento de trazar la ruta desde la comunidad de Collana hacia Primero de Enero, para determinar la altura de salto más crítico presente. Se realiza la observación con respecto al siguiente perfil de elevación:

**Figura 23.** Perfil de elevación entre las comunidades de Collana y Primero de Enero.



**Fuente:** Autoría propia.

Las abscisas en donde se presenta el mayor salto de agua a nivel crítico son las abscisas 0+673 y 1+438, donde se realizará el análisis para la turbina a aplicar. Para determinar la longitud de salto entre estas dos abscisas, se evalúa las cotas de las abscisas seleccionadas y se restan para obtener la altura del salto de la cual se realizará el análisis para la turbina y posterior el cálculo de la potencia requerida de las bombas hidráulicas.

**Tabla 9.** *Abscisas y cotas de zona con mayor altura de salto en tramo Collana – Primero de Enero.*

Abscisa	Cota
0+673	2657.843
1+438	2987.478

**Fuente:** Autoría propia.

Al realizar la diferencia de cotas, se puede determinar que, para el tramo Collana – Primero de Enero, tiene una altura de salto de 329.365 metros, el cual será para el análisis para el tipo de turbina a aplicarse.

### ***Tramo Collana – Tucto***

En el tramo de Collana - Tucto, se analiza el perfil de elevación del terreno para determinar la mayor longitud de salto existente. En la ruta se experimentan diversas pendientes, pero la que más se destaca sería entre las abscisas 0+251 y la abscisa 0+878, en donde se presenta la mayor longitud de salto entre pendientes.

**Figura 24.** *Perfil de elevación entre las comunidades de Collana y Tucto.*



**Fuente:** Autoría propia.

Entre las abscisas consideradas para la longitud de salto, se analiza el perfil de elevación para obtener el valor de diferencia de cotas a analizar.

**Tabla 10.** *Abscisas y cotas de zona con mayor altura de salto en tramo Collana - Tucto.*

<b>Abscisa</b>	<b>Cota</b>
0+251	2580.161
0+878	2792.01

**Fuente:** Autoría propia.

Por lo que, la longitud de salto más crítico en el tramo será de 211.85 metros, realizando la diferencia de cotas entre las abscisas a analizar según el perfil de elevación obtenido de Google Earth.

#### **4.1.4 Determinación del tipo de turbina a aplicar**

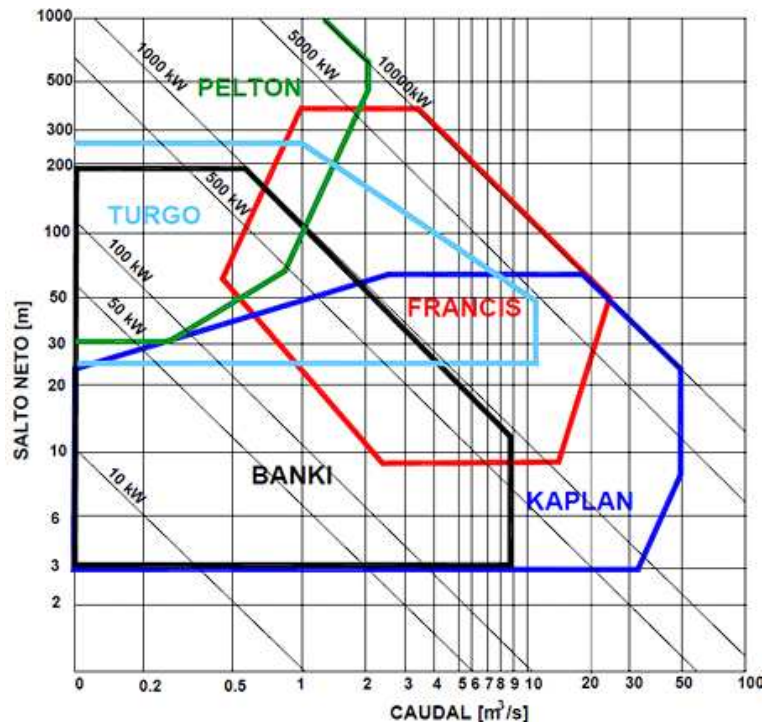
**Tabla 11.** *Datos hidráulicos y topográficos de tramos a analizar.*

<b>Tramo</b>	<b>Caudal por circular (l/s)</b>	<b>Mayor longitud de salto (m)</b>
Cazhapugro – La Esperanza	13.67	165.352
Collana – Primero de Enero	9.11	329.365
Collana – Tucto	9.11	211.85

**Fuente:** Autoría propia.

Para el análisis de la turbina que rendirá un mejor trabajo a la diferencia de cotas presentado, se realiza una comparación con los datos analizados y la siguiente figura, para determinar la turbina a aplicar en las rutas de sistemas de riego.

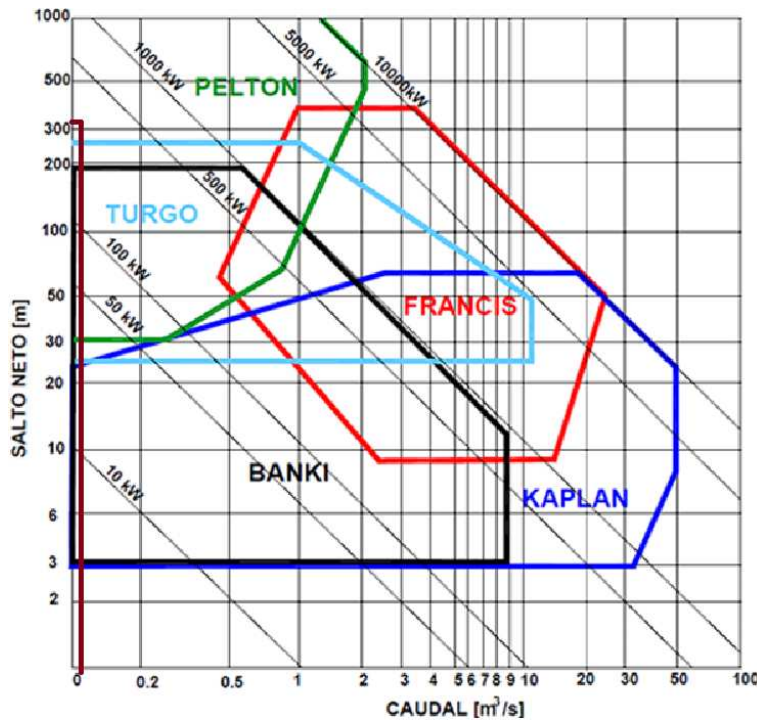
**Figura 25.** Nomograma para selección de turbina a aplicar de acuerdo al caudal y salto de agua.



**Fuente:** (Paraguay Cconovilca, 2021).

Teniendo en consideración el caudal mayor y la cota con mayor longitud de salto, se determina el tipo de turbina a aplicar, en función del caudal y el salto de agua requerido para la producción de energía eléctrica. El caudal a considerar será la que circula por el tramo Cahzapugro – La Esperanza, con un gasto de 13.67 l/s, la cual convirtiendo en m<sup>3</sup>/s será de 0.0137 m<sup>3</sup>/s; y el mayor salto de agua para el análisis será la del tramo Collana – Primero de Enero, en donde se produce una longitud de salto de 329.365 metros. Con los datos considerados, se analiza con la gráfica de la figura anterior, y se determina lo siguiente:

**Figura 26.** Tipo de turbina a aplicar según los datos analizados.



**Fuente:** Autoría propia.

Con los datos considerados, se plantea que el tipo de turbina a aplicar para la generación de energía eléctrica hacia las bombas hidráulicas será una turbina Pelton, debido a que son caudales muy pequeños, pero con una alta longitud de salto. También se puede considerar para los tramos con menor longitud de salto que el tramo Collana – Primero de Enero la implementación de una turbina Turgo en vez de una turbina Pelton, pero al momento de analizar la turbina Turgo se deduce que es una modificación de la turbina Pelton, por lo que se utiliza la turbina Pelton en todos los tramos a evaluar.

Según lo establecido en el punto 2.2.3, el rendimiento de las turbinas Pelton alcanzan rendimientos máximos del 90%, el cual será punto de evaluación para la generación de energía eléctrica.

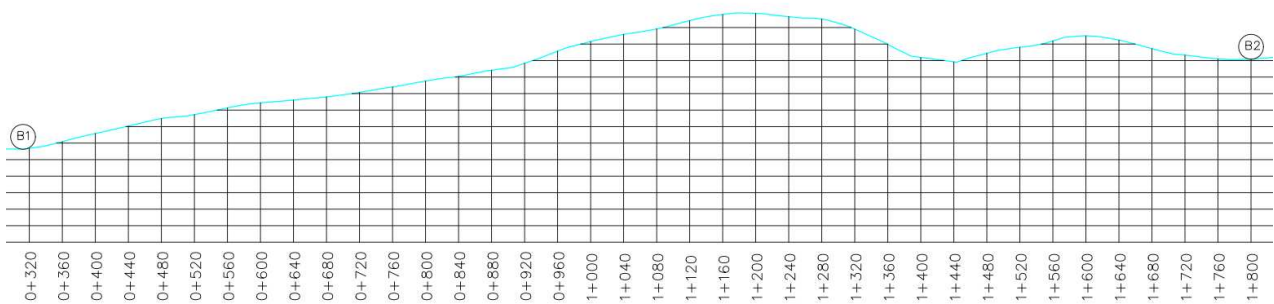
## 4.2. Análisis de punto de inicio y final de bombeo

Para determinar los puntos en donde se colocarán las estaciones de bombeo conjunto con su turbina para la generación de energía eléctrica, se analiza las topografías de cada tramo. Como se encuentra el área de estudio en el régimen Sierra del país, existen altas cotas y mucha pendiente entre las rutas, por lo que se determinará las ubicaciones de las estaciones de bombeo de acuerdo al perfil topográfico y, para simple hipótesis, colocar las estaciones de bombeo cuando la diferencia de elevación sean los más críticos del tramo, el cual se verificará posteriormente si, con la potencia de la bomba, alcanza tales puntos.

### 4.2.1 Tramo Cahzapugro – La Esperanza

Este tramo, teniendo una longitud total de 2629 metros, se ha estimado para posterior evaluación 2 estaciones de bombeo, colocadas en las abscisas 0+312 y 1+800 debido a que desde ese punto se presentan los saltos más críticos en la ruta a evaluar.

**Figura 27.** Planteamiento de estaciones de bombeo para el tramo Cahzapugro – La Esperanza.

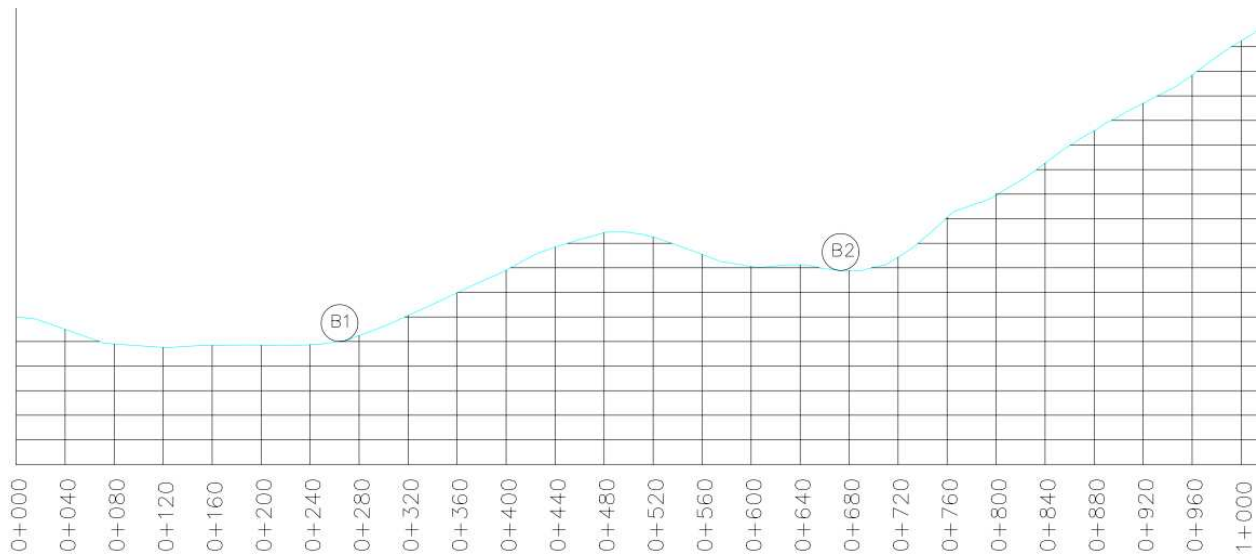


**Fuente:** Autoría propia.

#### 4.2.2 Tramo Collana – Primero de Enero

En el segundo tramo a analizar, se consideran 2 estaciones de bombeo, las cuales serán colocadas en las abscisas 0+264 y 0+673, las cuales potenciarán el agua para alcanzar saltos de agua de 89 y 330 metros respectivamente. En la siguiente figura se observa la colocación

**Figura 28.** Planteamiento de estaciones de bombeo para el tramo Collana – Primero de Enero.



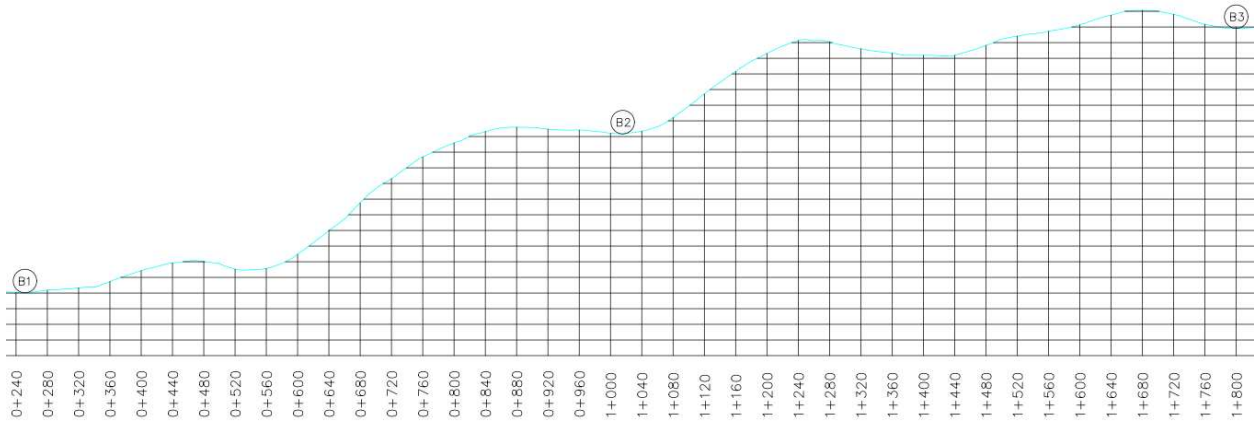
**Fuente:** Autoría propia.

#### 4.2.3 Tramo Collana – Tucto

Debido a que este tramo se presentan mayores pendientes, se ha optado por la presencia de 3 estaciones de bombeo, la primera para lograr un salto mayor a 200 metros, y las siguientes con saltos un poco mayor a los 100 metros. Una de las alternativas que se planteó para evitar un gran salto de agua es la colocación de más estaciones de bombeo, sin embargo, para evitar mayores gastos para la colocación de más estaciones de bombeo y turbinas, se presentan estaciones de bombeo con mayor potencia para lograr los saltos de agua requeridos de la zona.

En este tramo, se optan las estaciones de bombeo en las abscisas 0+251, 1+015 y 1+800, en donde la primera estación deberá lograr un salto de 212 metros aproximadamente, la cual será de mayor potencia que las otras bombas presentes para la ruta evaluada.

**Figura 29.** Perfil topográfico de tramo Collana – Tucto, con las estaciones de bombeo colocadas.



**Fuente:** Autoría propia.

### 4.3. Análisis de la potencia requerida

Se realiza un análisis de la topografía de las rutas desde las comunidades de Collana y Cahzapugro hacia las comunidades de La Esperanza, Tucto y Primero de Enero. De ahí se procede a calcular la potencia requerida de acuerdo a los valores de caudal determinados para cada ruta, como a su vez la diferencia de cotas existentes.

Se utilizan los perfiles topográficos realizados para la colocación de las estaciones de bombeo y, mediante aplicación del programa PTC Mathcad Prime 7.0.0, se calcula la potencia requerida para llevar a cabo el salto de agua, sin considerar temas de rendimiento debido a que solamente se determinará la potencia que necesita el agua para alcanzar los saltos de agua presente en las zonas de estudio.

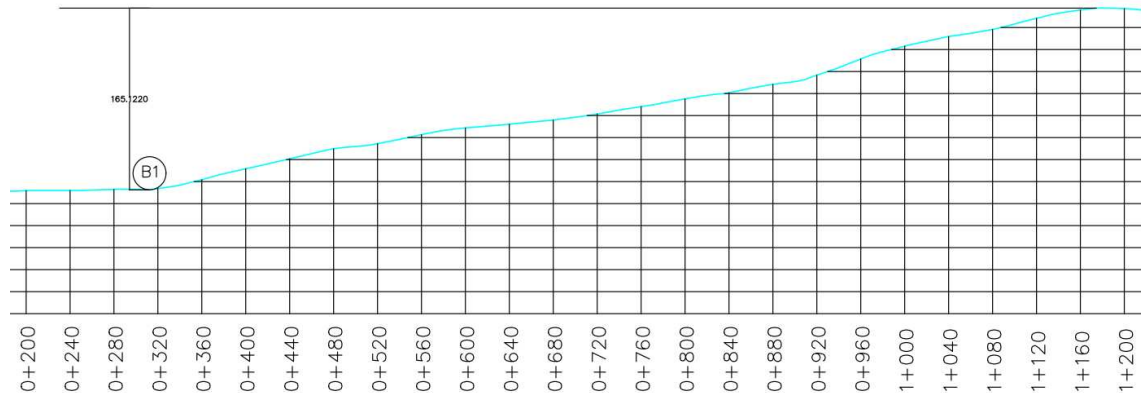
### 4.3.1 Tramo Cahzapugro – La Esperanza

Considerando los datos de la ecuación 5, se requiere para el cálculo de potencia requerida la diferencia de altura entre los saltos, el caudal que circula por la línea de conducción y el peso específico del agua, el cual se conoce que es 1000 kg/m<sup>3</sup>. Con los saltos de agua que se presentan en la figura 43, se realizan los siguientes cálculos para determinar la potencia teórica de la bomba requerida para lograr dichos saltos.

#### *Primer salto: B1*

El primer salto que se evalúa se encuentra entre la abscisa en donde se encuentra la bomba B1, y la abscisa 1+174, la cual se presenta el salto de agua más crítico en la ruta de Cahzapugro – La Esperanza. Se evalúa en estas abscisas su cota de elevación para el cálculo de potencia teórica que requiere la bomba para alcanzar dicho salto.

**Figura 30.** Diferencia de cotas a analizar en primer salto de la ruta Cahzapugro - La Esperanza.



**Fuente:** Autoría propia.

Una vez que se determina el punto inicial y punto final de las cotas, siendo de 2717.524 metros el punto inicial, en donde se ubica la bomba B1; y el punto final a una cota de 2877.646 metros, la

cual siendo el punto más alto del salto antes de llegar a la siguiente estación de bombeo, se realiza el siguiente cálculo para determinar la potencia teórica (sin considerar el rendimiento óptimo de la bomba) que requiere la estación de bombeo B1 para recorrer ese salto.

$$Pot_{teor} = 165.122 \text{ m} * 0.014 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

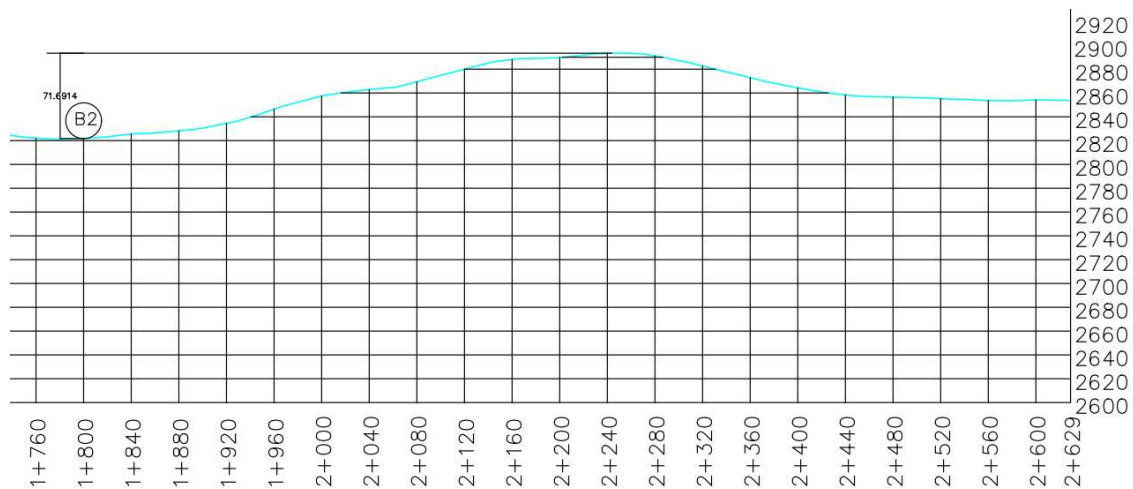
$$Pot_{teor} = 22.136 \text{ kW} \approx 29.685 \text{ hp}$$

Asumiendo el valor a potencia comercial, se requiere una bomba B1 cuya potencia sea de 30 caballos de fuerza (hp, por sus siglas en inglés *horse power*) para alcanzar dicho salto de 165 metros.

**Segundo salto: B2**

El segundo salto que se evalúa en la ruta se considera desde la estación de bombeo B2 y el punto más alto existente desde la bomba B2 hasta la comunidad de La Esperanza. Para este análisis, se procede con el perfil topográfico y se evalúa el punto más alto en el segundo tramo de la línea de conducción.

**Figura 31.** Diferencia de cotas a analizar en segundo salto de la ruta Cahzapugro - La Esperanza.



**Fuente:** Autoría propia.

El punto inicial se considera en donde se coloca la estación de bombeo B2, siendo a la cota 2821.698 metros, y el punto final se considera el punto más elevado desde B2 hasta la comunidad de La Esperanza, la cual el punto analizado tiene una altura de 2893.389 metros. Una vez con los datos de altura inicial, altura final y, considerando el mismo valor de caudal por pertenecer a la misma ruta, se realiza el siguiente cálculo para determinar la potencia requerida de la bomba para lograr tal salto.

$$Pot_{teor} = 71.691 \text{ m} * 0.014 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$
$$Pot_{teor} = 9.611 \text{ kW} \approx 12.888 \text{ hp}$$

La potencia calculada que requiere la estación de bombeo B2 para lograr el salto de 71.69 metros es de 12.89 hp, el cual, a llevar a valores comerciales de potencia, se requerirá la instalación de una bomba con una potencia de 15 hp para llevar a cabo el salto de agua hacia la comunidad de La Esperanza.

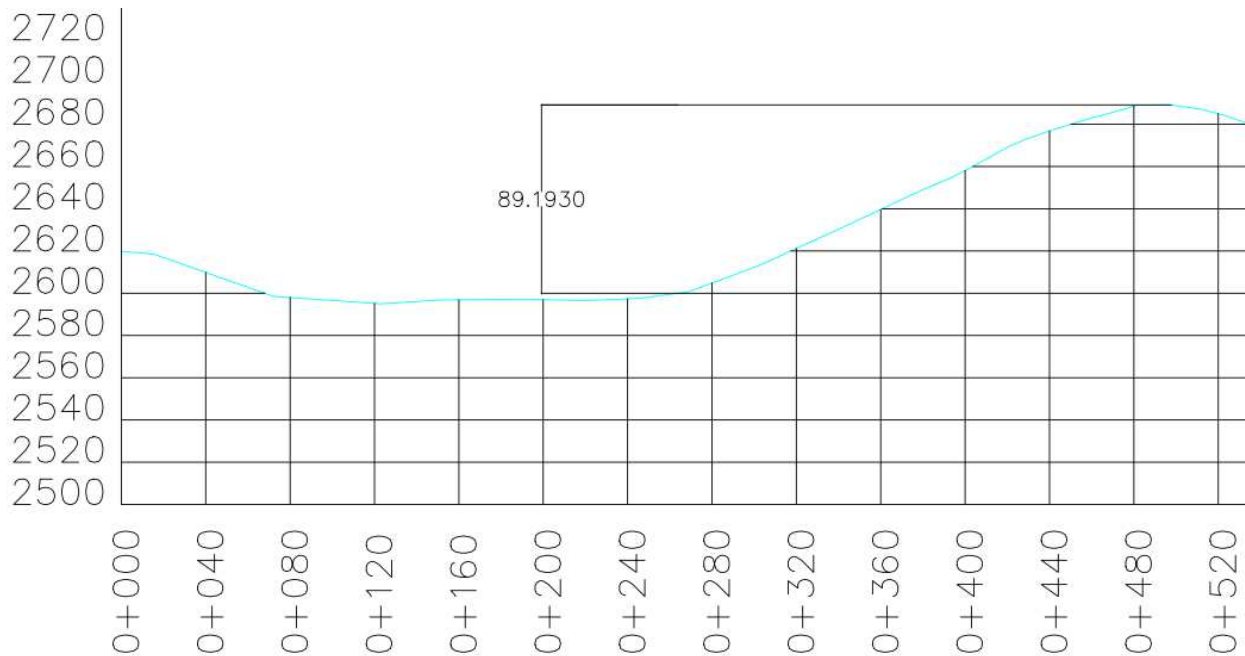
#### **4.3.2 Tramo Collana – Primero de Enero**

En la ruta Collana – Primero de Enero es donde se presenta el mayor salto entre las 3 rutas evaluadas, por lo que se estima que se requiera una bomba con una gran potencia para lograr el salto de agua. De igual forma que los puntos anteriores, se analizan los tramos en donde se encuentran las estaciones de bombeo planteadas para determinar la potencia requerida para que el agua recorra los saltos presentados por la pendiente del terreno.

**Primer tramo: B1**

El primer salto que se evalúa se encuentra entre la abscisa en donde se encuentra la bomba B1, y la abscisa 0+497, la cual se presenta el menor salto de agua que se recorre en la ruta. Se evalúa en estas abscisas su cota de elevación para el cálculo de potencia teórica que requiere la bomba para alcanzar dicho salto.

**Figura 32.** Diferencia de cotas a analizar en primer salto de la ruta Collana - Primero de Enero.



**Fuente:** Autoría propia.

Una vez que se determina el punto inicial y punto final de las cotas, siendo de 2600 metros el punto inicial, en donde se ubica la bomba B1; y el punto final a una cota de 2689.193 metros, la cual siendo el punto más alto del salto antes de llegar a la siguiente estación de bombeo, se realiza el siguiente cálculo para determinar la potencia teórica (sin considerar el rendimiento óptimo de la bomba) que requiere la estación de bombeo B1 para recorrer ese salto.

$$Pot_{teor} = 89.193 \text{ m} * 0.009 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

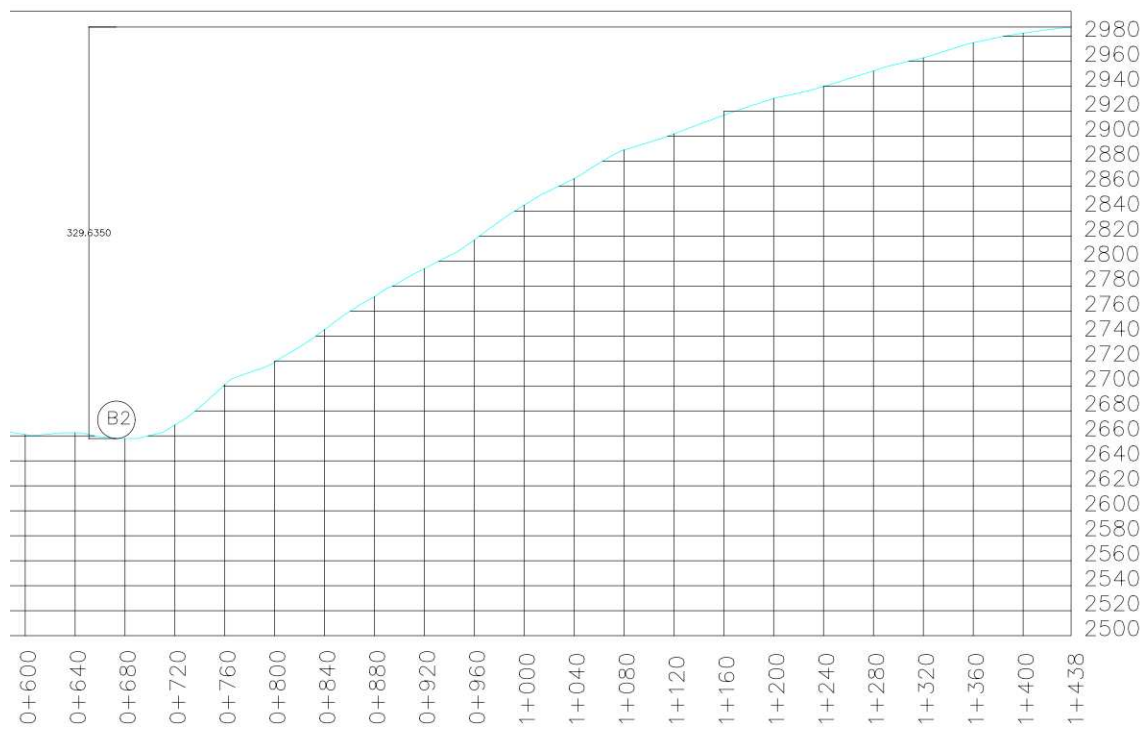
$$Pot_{teor} = 7.968 \text{ kW} \approx 10.686 \text{ hp}$$

La potencia calculada según los datos topográficos e hidráulicos llega a ser un valor de 10.686 hp, asumiendo a valores comerciales, se colocará en la estación de bombeo una potencia de 15 hp para llevar a cabo el primer salto de agua en la ruta.

### **Segundo tramo: B2**

En este segundo tramo de la ruta Collana – Primero de Enero, se presenta una diferencia de cotas elevada a comparación a todas las demás diferencias de alturas analizadas, por lo que se espera una gran potencia requerida para llevar a cabo el salto entre las cotas a analizar desde la estación de bombeo B2 y la comunidad de Primero de Enero.

**Figura 33.** Diferencia de cotas a analizar en segundo salto de la ruta Collana - Primero de Enero.



**Fuente:** Autoría propia.

El punto inicial se considera en donde se coloca la estación de bombeo B2, siendo a la cota 2657.843 metros, y el punto final se considera el punto más elevado desde B2 hasta la comunidad de Primero de Enero, la cual el punto analizado tiene una altura de 2987.478 metros, presentando una diferencia de cotas de 329.365 metros. Una vez con los datos de altura inicial, altura final y, considerando el mismo valor de caudal por pertenecer a la misma ruta, se realiza el siguiente cálculo para determinar la potencia requerida de la bomba para lograr tal salto.

$$Pot_{teor} = 329.365 \text{ m} * 0.009 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$
$$Pot_{teor} = 29.449 \text{ kW} \approx 39.492 \text{ hp}$$

Se presenta una potencia requerida de 39.49 hp para lograr el salto de agua desde la estación de bombeo B2 hasta la comunidad Primero de Enero. Dentro del área comercial, la bomba a adecuar a la línea de conducción sería una bomba con una capacidad de 40 hp para llevar a cabo el salto de agua que se necesita para transportar el agua hacia su punto de destino.

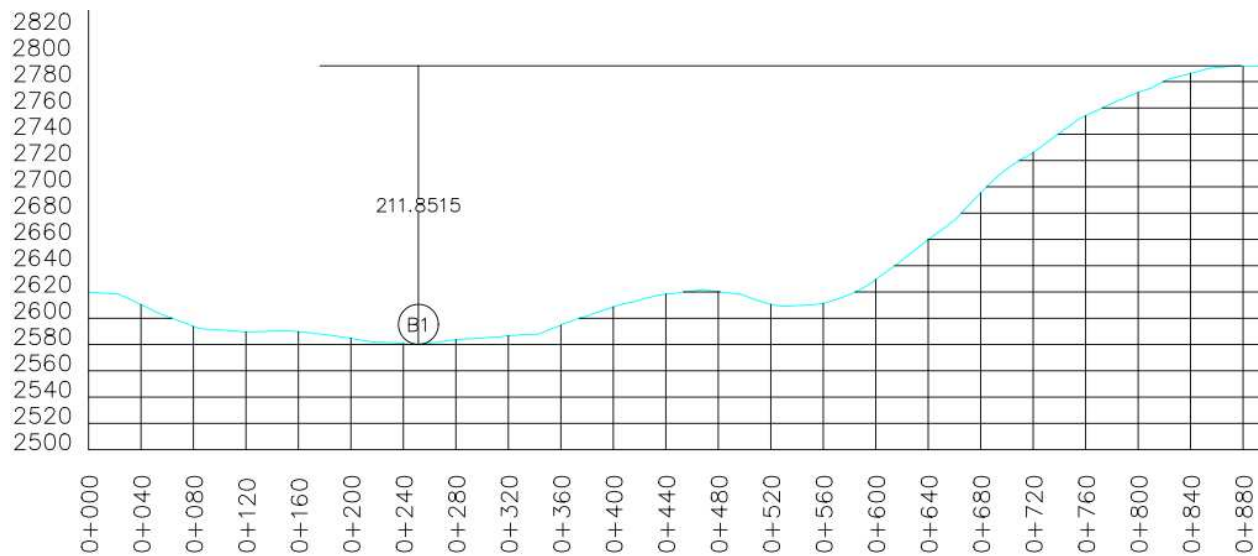
### **4.3.3 Tramo Collana – Tucto**

Debido a que la ruta Collana – Tucto es la que más pendientes posee, se ha optado por la instalación de 3 estaciones de bombeo, por lo que se debe analizar cada tramo de la ruta para obtener la potencia requerida para lograr los saltos de agua en su transporte.

#### ***Primer tramo: B1***

El primer salto que se evalúa se encuentra entre la abscisa en donde se encuentra la bomba B1, y la abscisa 0+878. Se evalúa en estas abscisas su cota de elevación para el cálculo de potencia teórica que requiere la bomba para alcanzar dicho salto.

**Figura 34.** Diferencia de cotas a analizar en primer salto de la ruta Collana - Tucto.



**Fuente:** Autoría propia.

El punto inicial se considera en donde se coloca la estación de bombeo B1, siendo a la cota 2580.161 metros, y el punto final se considera el punto más elevado desde B1 hasta la ubicación de la estación B2, la cual el punto analizado tiene una altura de 2792.012 metros. Una vez con los datos de altura inicial, altura final y, considerando el mismo valor de caudal por pertenecer a la misma ruta, se realiza el siguiente cálculo para determinar la potencia requerida de la bomba para lograr tal salto.

$$Pot_{teor} = 211.851 \text{ m} * 0.009 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

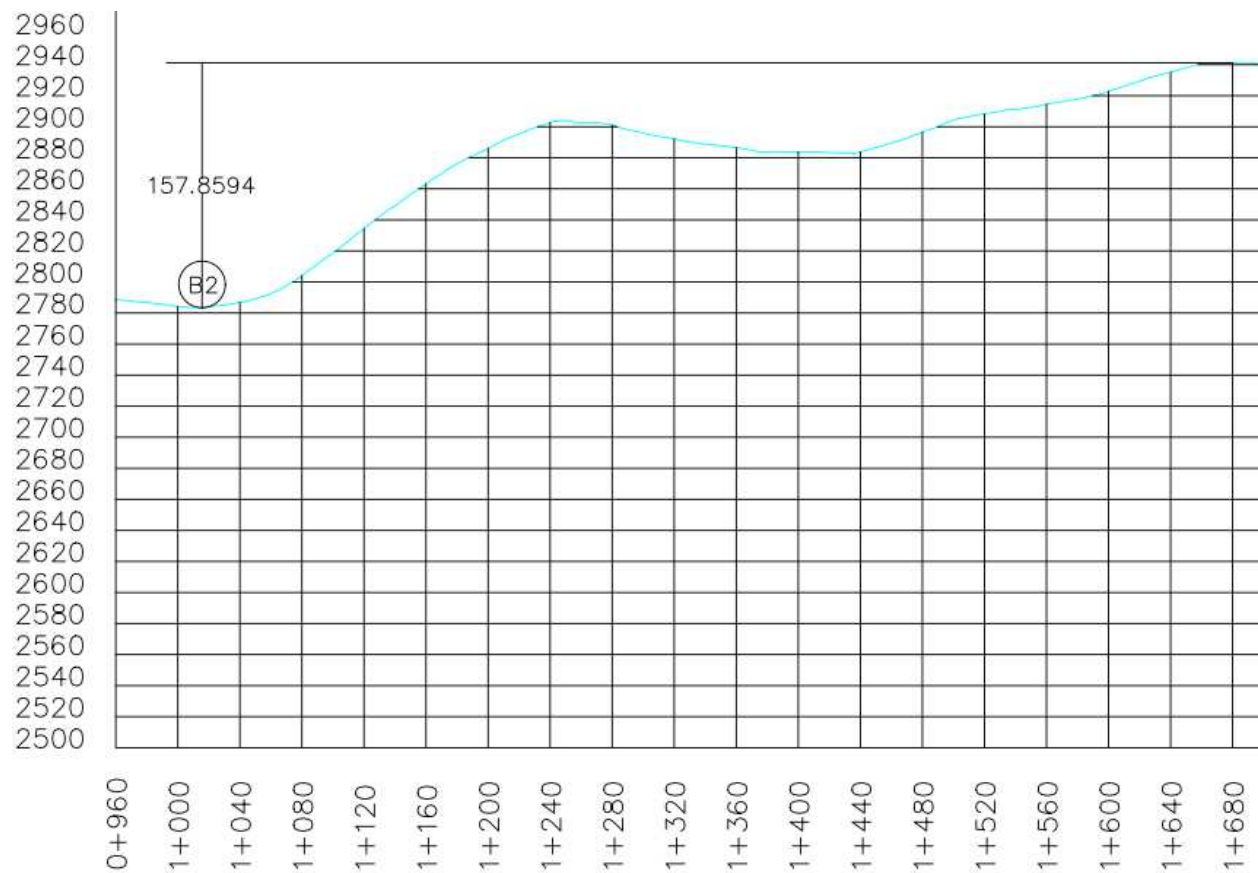
$$Pot_{teor} = 18.926 \text{ kW} \approx 25.381 \text{ hp}$$

La potencia requerida para lograr tal salto de 211.85 metros es de 25.381 hp según los datos calculados, pero tomando en cuenta las bombas comerciales, se implementaría una bomba centrífuga de 30 hp para que ejerza tal salto.

### Segundo tramo: B2

El segundo salto que se evalúa en la ruta se considera desde la estación de bombeo B2 y el punto más alto existente desde la bomba B2 hasta la estación en donde se ubica la bomba B3. Para este análisis, se procede con el perfil topográfico y se evalúa el punto más alto en el segundo tramo de la línea de conducción.

**Figura 35.** Diferencia de cotas a analizar en segundo salto de la ruta Collana - Tucto.



**Fuente:** Autoría propia.

El punto inicial se considera en donde se coloca la estación de bombeo B2, siendo a la cota 2783.342 metros, y el punto final se considera el punto más elevado desde B2 hasta la ubicación de la estación B3, la cual el punto analizado tiene una altura de 2941.201 metros. Una vez con los

datos de altura inicial, altura final y, considerando el mismo valor de caudal por pertenecer a la misma ruta, se realiza el siguiente cálculo para determinar la potencia requerida de la bomba para lograr tal salto.

$$Pot_{teor} = 157.859 \text{ m} * 0.009 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

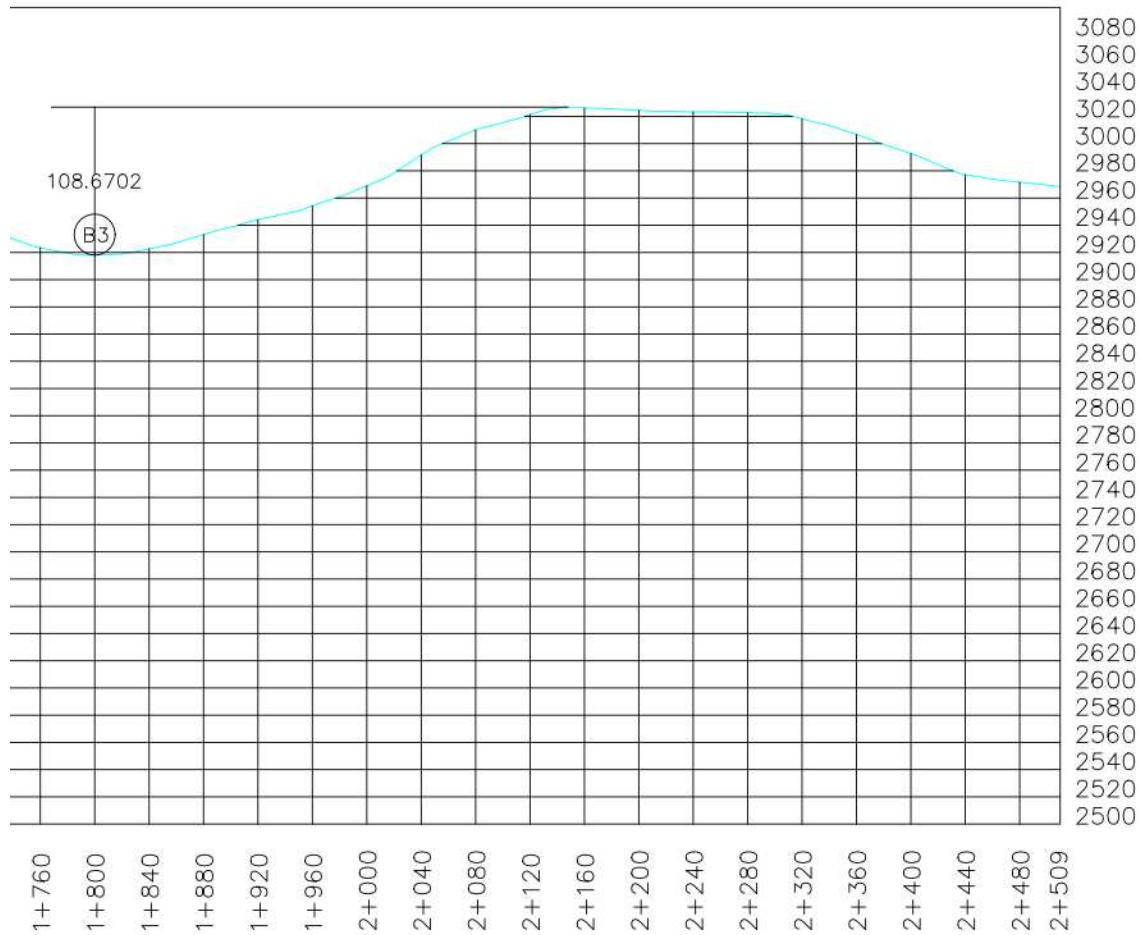
$$Pot_{teor} = 14.103 \text{ kW} \approx 18.912 \text{ hp}$$

Con los datos de cotas y valores de caudal perteneciente a la ruta de estudio, se estima que las bombas deberán ejercer una potencia de 18.91 hp para lograr el salto de agua de 157.86 metros. Pero, debido a que no existen bombas en el mercado con ese valor específico de potencia, se estima la colocación de una bomba de 20 hp en la estación B2.

### ***Tercer tramo: B3***

La tercera estación de bombeo se encargará de empujar el agua para que pueda ser transportada desde la estación B3 hasta la comunidad de Tucto. Para ver los puntos de análisis para el cálculo de potencia requerida, se analiza el perfil topográfico del tramo y se determina los puntos.

**Figura 36.** Diferencia de cotas a analizar en tercer salto de la ruta Collana - Tucto.



**Fuente:** Autoría propia.

El punto inicial se considera en donde se coloca la estación de bombeo B3, siendo a la cota 2918.122 metros, y el punto final se considera el punto más elevado desde B3 hasta la comunidad de Tucto, la cual el punto analizado tiene una altura de 3026.792 metros. Una vez con los datos de altura inicial, altura final y, considerando el mismo valor de caudal por pertenecer a la misma ruta, se realiza el siguiente cálculo para determinar la potencia requerida de la bomba para lograr tal salto.

$$Pot_{teor} = 108.67 \text{ m} * 0.009 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$Pot_{teor} = 9.708 \text{ kW} \approx 13.019 \text{ hp}$$

Con los datos pertenecientes desde la estación B3 hasta la comunidad de Tucto, se requiere que la bomba tenga una potencia de 13.02 hp para llevar a cabo el salto y transporte de agua a una altura de 108.67 metros. A nivel comercial, esta bomba será implementada con una potencia de 15 hp para llevar a cabo su función fundamental dentro de la línea de conducción.

#### **4.4. Análisis de la potencia que se puede generar a partir de los datos hidráulicos**

Debido a que se considera la energía potencial para la creación de energía eléctrica a través de las turbinas tipo Pelton, se realiza un análisis de las cotas de las rutas desde su distribución de la planta de tratamiento de agua potable en Ludo hasta el punto de las estaciones de bombeo. El flujo que circula por las tuberías, debido a la fuerza gravitatoria, generará la energía eléctrica la cual será proporcionada a la bomba para potenciar el agua hacia sus puntos de destino.

La planta de tratamiento de agua potable se encuentra en la cota 2851.75 msnm, la cual será el punto de partida para el cálculo de creación de energía eléctrica a través de las turbinas tipo Pelton. Cabe considerar que, al momento de realizar los cálculos de energía eléctrica, se debe aplicar el rendimiento óptimo de la turbina, debido a que una parte de la energía producida se queda en el motor o las turbinas al momento de su generación. En el caso de la turbina Pelton, se considera que tendrá un rendimiento óptimo del 90%, el cual será aplicado para los cálculos que se realizarán a continuación.

##### **4.4.1 Tramo Cahzapugro – La Esperanza**

Con los perfiles topográficos realizados, se conoce que la estación de bombeo B1 se encuentra en la cota 2600 msnm, y la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) en la cota 2851.75, se

aplican los principios de energía potencial para determinar la cantidad de energía que se genera en la línea de conducción del tramo Cahzapugro – La Esperanza.

Lo primero que se debe determinar para los cálculos de la potencia generada por las turbinas será el trabajo que realiza el agua a través de los conceptos de energía potencial. Utilizando la ecuación 2, se requiere la masa del agua que circula por las tuberías. Esta masa se obtiene multiplicando la densidad del agua por su caudal, y a su vez por el tiempo de retención del fluido. Como se trata de un fluido en constante movimiento, se considerará el tiempo de retención del caudal en 1 segundo, dando los siguientes cálculos.

$$Vol = 0.014 \frac{m^3}{s} * 1 s = 0.014 m^3$$

$$m = 1000 \frac{kgf}{m^3} * 0.014 m^3 = 13.67 kgf$$

Una vez que se ha calculado la masa de agua que transcurre las tuberías en el plazo de 1 segundo, se procede a calcular el trabajo que realiza el agua.

$$W_{PH2O} = 13.67 kgf * 9.81 \frac{m}{s^2} * (2851.75 m - 2712.524 m)$$

$$W_{PH2O} = 18664.207 J$$

Una vez que se obtenga el trabajo que se realiza el flujo de agua dentro de las tuberías, se debe determinar la potencia que generará la turbina. Para esto se determinan 2 factores: la potencia suministrada a la turbina, y el rendimiento de la turbina. La potencia suministrada a la turbina se calcula mediante el trabajo realizado, sobre el tiempo de retención del fluido debido a que se conoce como potencia al trabajo que se realiza en un determinado tiempo. Para el rendimiento de

la turbina, se estableció anteriormente que, por ser una turbina tipo Pelton, se considera un rendimiento óptimo del 90% para los cálculos.

$$P_{H2O} = \frac{18664.27 J}{1 s} = 25.029 hp$$

$$P_{Tur} = 25.029 * 90\% = 22.526 hp$$

Como se puede observar, desde la planta de tratamiento de agua potable hasta la estación de bombeo B1 se genera una potencia de 22.526 caballos de fuerza (hp), la cual será suministrada a la bomba para llevar a cabo los saltos de agua.

De igual forma, se realiza este análisis en todos los puntos antes de las estaciones de bombeo, para determinar la potencia suministrada a las turbinas, para alimentar a las bombas hidráulicas y lograr los saltos de agua requeridos.

### ***Segundo salto: B2***

Aquí se realiza un análisis desde la colina existente en la abscisa 1+600 hasta la estación de bombeo B2 del tramo. Se conoce que, mediante el perfil topográfico, el punto más alto de la colina se encuentra en la cota 2850.09 metros, y que la estación de bombeo B2 se encuentra en la cota 2821.698 metros. Mediante estos datos, se determinará la energía generada a través de la energía potencial del agua.

El valor de masa del agua se conserva debido a que no se ha variado ningún dato de caudal, tiempo de retención o la densidad del agua, por lo que se calcula solamente el trabajo y la potencia en el sistema de la estación B2.

$$W_{P_{H2O}} = 13.67 kgf * 9.81 \frac{m}{s^2} * (2850.09 m - 2821.698 m)$$

$$W_{PH2O} = 3806.144 J$$

$$P_{H2O} = \frac{3806.144 J}{1 s} = 5.104 hp$$

$$P_{Tur} = 5.104 * 90\% = 4.594 hp$$

#### 4.4.2 Tramo Collana – Primero de Enero

De igual forma, para la estación de bombeo B1 de esta ruta, se evalúa la potencia generada desde la planta de tratamiento de agua potable hasta la estación B1. Para ello se realizan los mismos cálculos que en el punto 4.5.1, para determinar la masa del flujo de agua, el trabajo producido, y la potencia.

$$Vol = 0.009 \frac{m^3}{s} * 1 s = 0.009 m^3$$

$$m = 1000 \frac{kgf}{m^3} * 0.009 m^3 = 9.11 kgf$$

Una vez calculada la masa de agua, se procede a determinar el trabajo que produce el agua dentro de las tuberías.

$$W_{PH2O} = 9.11 kgf * 9.81 \frac{m}{s^2} * (2851.75 m - 2600 m)$$

$$W_{PH2O} = 22490.988 J$$

Al momento de haber calculado el trabajo que realizan las corrientes de agua, se procede a determinar la potencia que ingresa a la turbina de la estación B1, y la potencia que egresa de la turbina, la cual será alimento para la bomba ubicada en el mismo sector.

$$P_{H2O} = \frac{22490.988 J}{1 s} = 30.161 hp$$

$$P_{Tur} = 30.161 * 90\% = 27.145 \text{ hp}$$

Por lo que, desde la planta de tratamiento hasta la estación B1, se produce una potencia igual a 27.145 hp con la turbina implementada, la cual alimentará la estación de bombeo B1.

***Segundo salto: B2***

De igual forma, se analiza el punto de mayor salto de la estación B1 hasta la estación B2, en donde, por fuerzas gravitatorias, se producirá la energía potencial que la turbina convertirá en energía eléctrica para la bomba. El punto más alto en el tramo desde B1 a B2 se encuentra en la cota 2689.193 metros, la cual llegará hacia la bomba B2, la cual se encuentra en la cota 2657.843 metros.

$$Vol = 0.009 \frac{m^3}{s} * 1 s = 0.009 m^3$$

$$m = 1000 \frac{kgf}{m^3} * 0.009 m^3 = 9.11 \text{ kgf}$$

Una vez determinada la masa, se procede a calcular el trabajo que realiza el flujo del agua dentro de las tuberías.

$$W_{PH_2O} = 9.11 \text{ kgf} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (2689.193 \text{ m} - 2657.843 \text{ m})$$

$$W_{PH_2O} = 2800.765 \text{ J}$$

Ya que se obtenga el valor de trabajo que se realiza en la línea de conducción hacia la estación B2, se determina el valor de potencia suministrada a la turbina, y la potencia que egresa de la turbina, considerando que tiene un rendimiento óptimo del 90%.

$$P_{H_2O} = \frac{2800.765 \text{ J}}{1 s} = 3.756 \text{ hp}$$

$$P_{Tur} = 3.756 * 90\% = 3.38 \text{ hp}$$

Como se observa, debido a que la diferencia de alturas es poca, se genera poca cantidad de energía eléctrica mediante la turbina, generando solamente 3.38 hp, la cual alimentará la estación de bombeo B2, donde posteriormente se realizará el análisis de producción y demanda.

#### 4.4.3 Tramo Collana – Tucto

En este tramo se analizan 3 recorridos: desde la planta de tratamiento hasta la estación B1, desde el punto más alto entre el tramo B1-B2 hasta B2, y el punto más alto entre el tramo B2-B3 hasta el tramo B3. Estos análisis se realizan debido a que la generación de energía eléctrica se basa con las fuerzas gravitatorias, entrando en los principios de la energía potencial. Por lo que, en este tramo, se procede a analizar el primer recorrido.

La planta de tratamiento de agua potable se encuentra en la cota 2851.75 metros, y el punto B1 en el tramo Collana – Tucto se encuentra en la cota 2580.161 metros. A través de estas alturas, se realizan los cálculos de generación de energía eléctrica.

$$Vol = 0.009 \frac{m^3}{s} * 1 s = 0.009 m^3$$

$$m = 1000 \frac{kgf}{m^3} * 0.009 m^3 = 9.11 kgf$$

Ya que se obtiene el valor de masa que recorre las tuberías en el intervalo de un segundo, se procede a calcular el trabajo que realiza el agua al momento de navegar por la línea de conducción.

$$W_{PH2O} = 9.11 kgf * 9.81 \frac{m}{s^2} * (2851.75 m - 2580.161 m)$$

$$W_{PH2O} = 24263.376 J$$

Con el valor de trabajo obtenido, se procede a determinar la potencia suministrada a la turbina, y la potencia que genera la turbina, descontando el porcentaje que se queda en el sistema.

$$P_{H2O} = \frac{24263.376 J}{1 s} = 32.538 hp$$

$$P_{Tur} = 32.538 * 90\% = 29.284 hp$$

Con los datos hidráulicos presentados y los niveles topográficos mostrados anteriormente, se determina que la potencia que genera la turbina para la estación B1 será de 29.28 caballos de fuerza, siendo alimento para la bomba ubicada en la misma estación.

### ***Segundo salto: B2***

Debido a que se trata del mismo tramo de análisis que la estación B1, se utiliza el mismo valor de masa que circula por la tubería para determinar el valor de trabajo que realiza el agua dentro de la línea de conducción.

$$W_{PH2O} = 9.11 kgf * 9.81 \frac{m}{s^2} * (2792.083 m - 2783.342 m)$$

$$W_{PH2O} = 780.909 J$$

Una vez que se obtenga el valor de trabajo generado por la masa de agua que circula, se determina la potencia que genera la corriente de agua mediante la turbina hidráulica.

$$P_{H2O} = \frac{780.909 J}{1 s} = 1.047 hp$$

$$P_{Tur} = 1.047 * 90\% = 0.942 hp$$

Debido a que se presenta un poco diferencia de altura entre los puntos de análisis para la generación de energía eléctrica, se genera una potencia de 0.942 hp, siendo alimento para la bomba hidráulica colocada en el punto B2.

### **Tercer salto: B3**

Igual que en los primeros 2 saltos que se analizan, la masa de agua que circula por la tubería se mantiene constante por todo su recorrido, por lo que se aplica el mismo valor para la determinación del trabajo realizado en la estación B3.

$$W_{PH_2O} = 9.11 \text{ kgf} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (2941.201 \text{ m} - 2918.118 \text{ m})$$

$$W_{PH_2O} = 2062.202 \text{ J}$$

Ya que se obtenga el trabajo realizado en las líneas de conducción hacia la comunidad de Tucto, con este valor se procede a calcular las potencias que ingresan a la turbina debido a fuerzas gravitatorias, como a su vez la potencia que genera la turbina.

$$P_{H_2O} = \frac{2062.202 \text{ J}}{1 \text{ s}} = 2.765 \text{ hp}$$

$$P_{Tur} = 2.765 * 90\% = 2.489 \text{ hp}$$

Al concluir los cálculos, se determina que la potencia que genera la turbina perteneciente a la estación B3 es de 2.5 hp aproximadamente. Esto se analizará conjunta a la potencia requerida de las bombas para llevar a cabo los saltos de agua necesarios para satisfacer las necesidades básicas de las comunidades a servir.

#### **4.5. Manejo del software Allievi para un correcto funcionamiento del sifón**

Una vez planteada las estaciones de bombeo dentro de las rutas de análisis, se debe considerar la presión que existe en los sifones y en las tuberías, ya que si existe alta presión en las tuberías se debe considerar cambios en el material a aplicar para tubería. Se analizan las rutas conjuntas con las estaciones de bombeo aplicadas en el punto anterior, con la finalidad de observar el comportamiento de presión presente en las tuberías, y verificar si los niveles de presión son

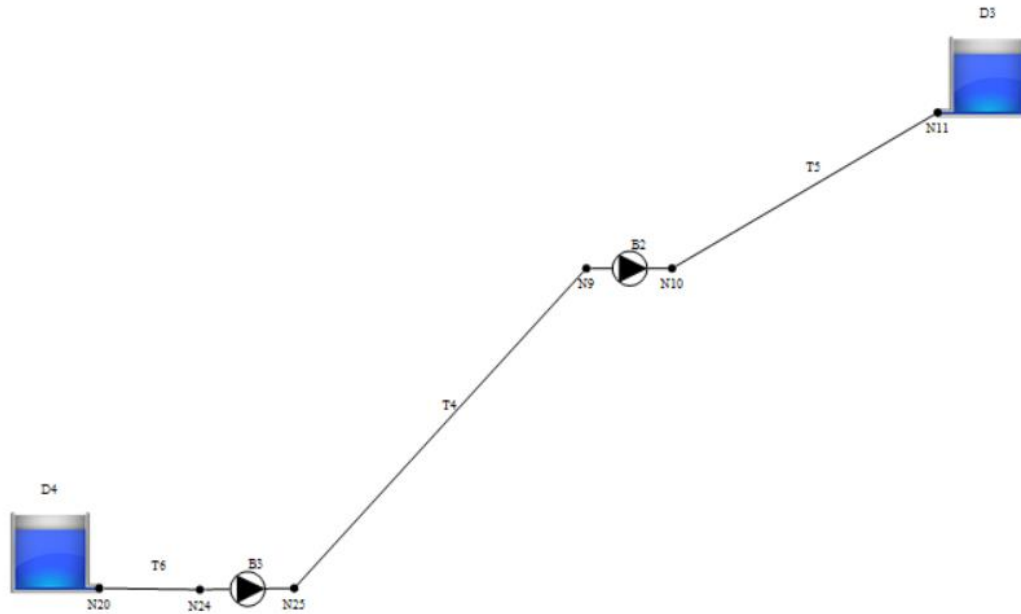
adecuados para que las estaciones bombeo se instalen según lo propuesto, y si el material de tubería resiste la presión generada en la red. Dentro del programa Allievi, se determinan cada tramo a evaluar, como a su vez ingresar los datos pertenecientes a la ruta.

#### **4.5.1 Datos ingresados al programa**

Para que se lleve a cabo el análisis de la ruta, se debe realizar el trazado de la ruta. Cabe recalcar que no importa el dibujo de la ruta, ya que para cada tubería se puede asignar perfiles según los datos topográficos. A su vez, se deben asignar los elementos pertenecientes a cada ruta, la cual el programa ayuda con su opción de dibujo rápido, teniendo elementos hidráulicos tales como: nodos, tuberías, depósitos, y las estaciones de bombeo. Una vez identificada cada de los elementos a aplicar, se procede con el dibujo de cada ruta y los datos a ingresar al software.

El siguiente dibujo será parecido en cada uno de los tramos, debido a que la ubicación de los elementos no perjudica el análisis de la línea de conducción. Esto no perjudica debido a que se establecen las cotas en que se encuentran los elementos, como a su vez el perfil de las tuberías.

**Figura 37.** Trazado de rutas para su análisis en Allievi.



**Fuente:** Autoría propia.

Cada elemento tiene asignado datos, los cuales se requieren para los cálculos dentro del programa tanto para el régimen permanente como régimen transitorio. Estos datos varían entre nivel de cota, longitud de tubería, profundidad del depósito, espesor y diámetro interno de tuberías, caudal, diferencia de alturas y revoluciones por minuto para las estaciones de bombeo a analizar.

**Tabla 12.** Datos ingresados para depósitos en Allievi.

Nombre	Cota de suelo ( $Z_s$ ) (m)	Tipo de depósito	Cota nivel de agua ( $Z_0$ ) (m)
<b>D3</b>	2853	Gran depósito (GD)	2857
<b>D4</b>	2715	Gran depósito (GD)	2719

**Fuente:** Autoría propia.

La característica de gran depósito se refiere a que el nivel en que se encuentra el depósito es constante, es decir, no existe variación en las cotas al momento de entrada o salida del agua. Debido a que se plantea los depósitos dentro de las comunidades, se considera a que se encuentran en un nivel constante para la distribución de agua hacia las otras comunidades o a las familias pertenecientes de las comunidades.

**Tabla 13.** *Datos ingresados para nodos en Allievi.*

<b>Nombre</b>	<b>Cota (m)</b>
<b>N9</b>	2821
<b>N10</b>	2821
<b>N11</b>	2853
<b>N20</b>	2715
<b>N24</b>	2712
<b>N25</b>	2712

**Fuente:** Autoría propia.

Los nodos se implementan en el programa para analizar la presión que circula entre estos puntos, colocadas principalmente en los puntos más críticos en el tramo tales como: salida y entrada de depósitos y la entrada y salida de las estaciones de bombeo.

**Tabla 14.** *Datos ingresados para análisis de tuberías en Allievi.*

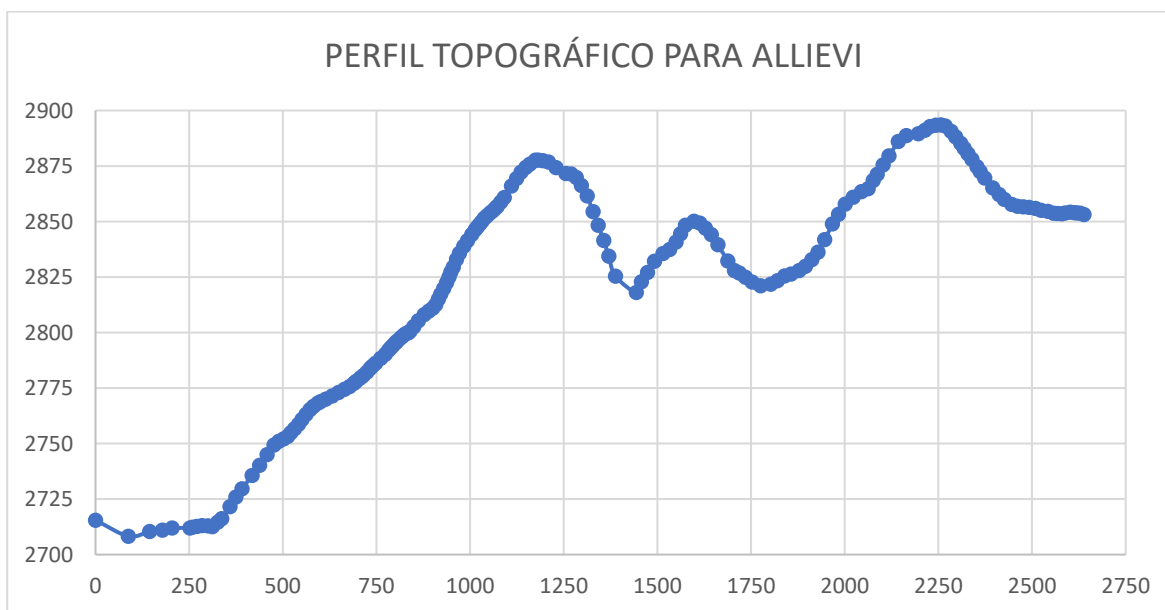
<b>Nombre</b>	<b>Cota inicial (Zi) (m)</b>	<b>Cota final (Zf) (m)</b>	<b>Diámetro interno (mm)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Celeridad (m/s)</b>
---------------	------------------------------	----------------------------	------------------------------	---------------------	---------------------	------------------------

<b>T4</b>	2712	2821	230.8	1488	9.6	1282.1421
<b>T5</b>	2821	2853	230.8	839	9.6	1282.1421
<b>T6</b>	2715	2712	230.8	312	9.6	1282.1421

**Fuente:** Autoría propia.

Para los datos de diámetro y espesor de las tuberías, se consideró el mismo diámetro correspondiente desde el río Minas hasta la planta de tratamiento de Ludo, ya que son considerados para conductos de alta presión. La celeridad es determinada por el programa Allievi, requiriendo el coeficiente del material empleado en la tubería, el espesor y el diámetro interno de la tubería. Para establecer el perfil de las tuberías, se considera el perfil topográfico correspondiente al tramo a evaluar.

**Figura 38.** Configuración de tubería para perfiles de conducción.



*Nota:* Se presenta el perfil topográfico perteneciente al tramo Cahzapugro – La Esperanza; se insertan los perfiles pertenecientes a cada tramo.

**Fuente:** Autoría propia.

Los datos pertenecientes a los perfiles de conducción de las tuberías son los datos obtenidos de los perfiles topográficos de cada tramo, ya que depende de las pendientes para analizar la circulación del agua dentro de las tuberías y su comportamiento.

**Tabla 15.** *Datos ingresados para el análisis con estaciones de bombeo.*

<b>Nombre</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Número de bombas</b>	<b>Número de Revoluciones</b>	<b>Inercia de bombas (kg*m2)</b>
<b>B2</b>	2821	1	3200	0.049
<b>B3</b>	2712	1	3600	0.121

**Fuente:** Autoría propia.

El cálculo de la inercia de las bombas, al igual que la celeridad en tuberías, también lo realiza el programa Allievi. Para realizar el cálculo, se requiere, de ciertos datos tales como: el caudal que entra a la estación de bombeo, la altura de salto requerido en el sistema, el rendimiento de la bomba y la velocidad de rotación de la bomba. El rendimiento y velocidad de rotación se determina según la potencia requerida para llevar a cabo tales saltos, donde se obtiene un rendimiento del 75% debido a que cierta cantidad de caudal suele quedar en el sistema de bombeo, o se pierde la potencia; y la velocidad de rotación depende de los catálogos de bombas según la potencia.

**Figura 39.** Configuración de datos para cálculo de inercia en su punto óptimo.

Cálculo de la inercia de las bombas en la estación de bombeo B3

Cálculo de la inercia de las bombas en la estación de bombeo seleccionada

Permite asignar valor a la inercia o calcularla mediante la introducción de parámetros

Especificar inercia

Inercia (Kg\*m2) 0.121

Calcular inercia con los datos del punto óptimo de funcionamiento

Caudal (l/s) 13.670

Altura (m) 165.122

Rendimiento (%) 75.000

Velocidad rotación (rpm) 3,600.000

Inercia (Kg\*m2) 0.121      Potencia (Kw) 29.524

Guardar      Cancelar

**Fuente:** Autoría propia.

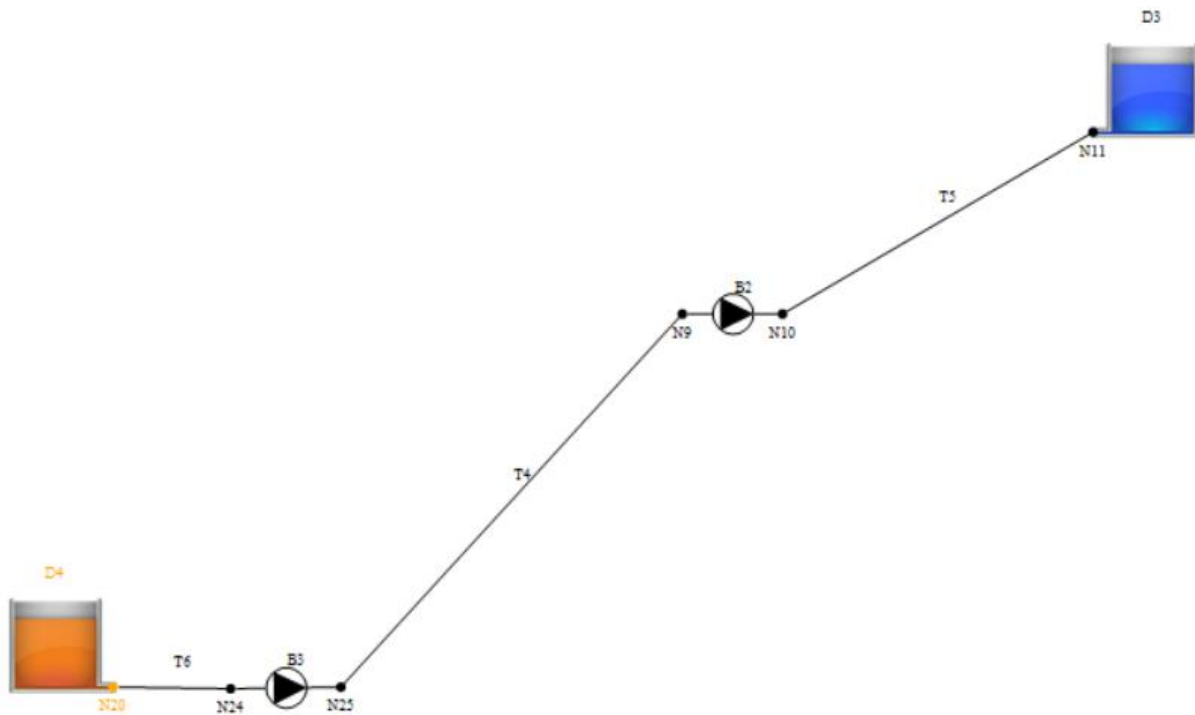
Una vez que se ingresan los datos de cada tramo, se procede a ejecutar el programa para que realicen los cálculos y analizar tanto para régimen permanente y régimen transitorio, es decir, un análisis que permanece constante y un análisis que varía según el tiempo de duración. También cabe recalcar que en algunos casos puede presentarse cavitaciones, es decir, cavidades de vapor presentes en el agua, en donde se generan cuando existen diferencias de presión.

#### 4.5.2 Análisis de régimen permanente

En este análisis, se evalúan las líneas de conducción en un entorno la cual la velocidad en que viajan las partículas de agua permanece igual por todo el tramo. Se establece un intervalo de tiempo 0.5 segundos para el cálculo de régimen permanente, con la finalidad de evaluar la velocidad del fluido durante este intervalo de tiempo.

### *Tramo Cahzapugro – La Esperanza*

**Figura 40.** Dibujo de línea de conducción Cahzapugro - La Esperanza.



**Fuente:** Autoría propia.

Al momento de correr el programa, se obtienen los resultados del cálculo de régimen permanente, primero comenzando por los nudos presentes en el tramo. En los nudos se evalúan las presiones que se generan en cada uno de los puntos, desde las salidas y entradas de los depósitos hasta los puntos de entrada y salida de las bombas hidráulicas.

**Figura 41.** *Análisis de presión en nudos en el régimen permanente del tramo Cahzapugro - La Esperanza.*



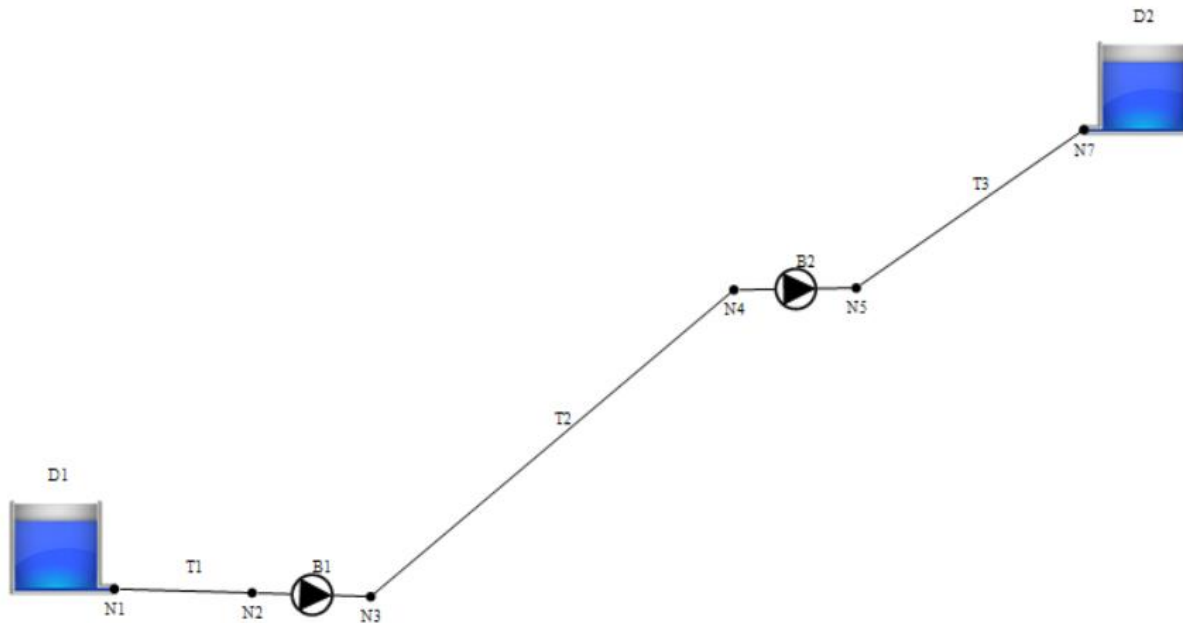
	Nombre	H(m)	Pr(m)	
<b>1</b>	N19_fin	2719.00	4.00	
<b>2</b>	N20	2719.00	4.00	
	<b>3</b>	N24	2719.12	7.12
<b>4</b>	N25	2814.64	102.64	
<b>5</b>	N9	2815.21	-5.79	
	<b>6</b>	N10	2856.68	35.68
<b>7</b>	N11	2857.00	4.00	
<b>8</b>	N11_fin	2857.00	4.00	

**Fuente:** Autoría propia.

En el nudo N9, se presenta una presión negativa. Esta presión negativa no indica que no está llegando el agua hasta tal punto, sino que la presión en ese nudo se vuelve menor a la presión atmosférica, pero igualmente sigue circulando. El punto más alto de presión llega a ser en el nudo N25, es decir, el punto de salida de la estación de bombeo B1, siendo el punto donde mayor potencia se requiere para los saltos de agua según la topografía del sector.

**Tramo Collana – Primero de Enero**

**Figura 42.** Dibujo de línea de conducción Collana – Primero de Enero.



**Fuente:** Autoría propia.

Ya que se ingresan los datos de caudal y topografía perteneciente al tramo de estudio, se evalúan las presiones pertenecientes a los nudos del tramo evaluado.

**Figura 43.** Análisis de presión en nudos en el régimen permanente del tramo Collana - Primero de Enero.

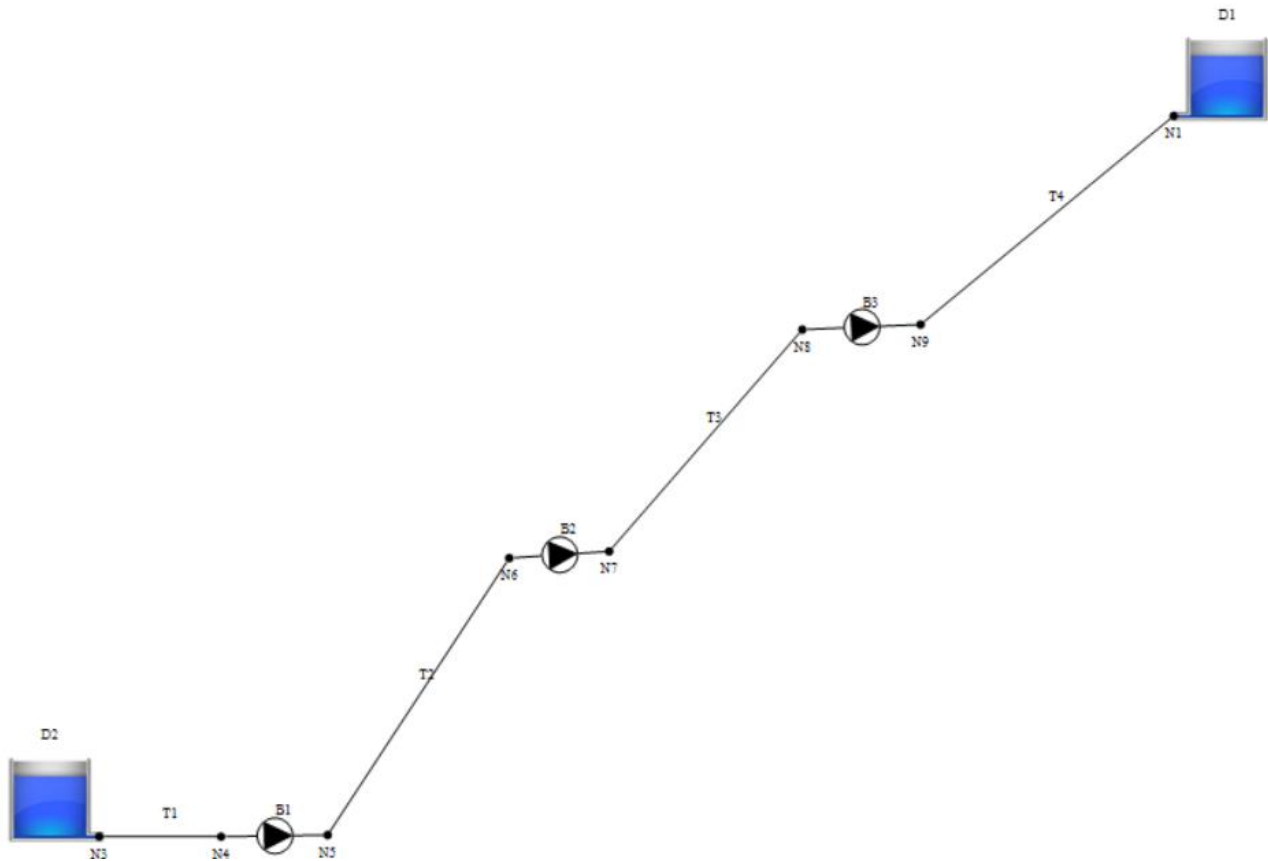
	Nombre	H(m)	Pr(m)
1	N0_fin	2623.85	4.00
2	N1	2623.85	4.00
3	N2	2623.92	23.92
4	N3	2702.13	102.13
5	N4	2702.24	44.40
6	N5	2991.27	333.43
7	N7	2991.48	4.00
8	N7_fin	2991.48	4.00

**Fuente:** Autoría propia.

En el segundo tramo, no se presentan presiones negativas como en el primer tramo, todas siendo mayor que la presión atmosférica. La mayor presión que se genera en el tramo proviene del nudo N5, la cual proviene del punto de salida de la estación de bombeo B2, generando una presión en el régimen permanente de 333.43 metros. La menor presión que se genera en la línea de conducción proviene de los puntos de entrada y de salida de los depósitos, lo cual indica que no existen alteraciones en presiones.

### ***Tramo Collana – Tucto***

**Figura 44.** Dibujo de línea de conducción Collana – Tucto.



**Fuente:** Autoría propia.

Al momento en que se ingresan los datos hidráulicos y topográficos, se corre el programa para determinar las presiones que se generan en cada uno de los nudos.

**Figura 45.** *Análisis de presión en nudos en el régimen permanente del tramo Collana - Tucto.*



	Nombre	H(m)	Pr(m)
1	N1	2972.25	4.00
2	N1_fin	2972.25	4.00
3	N2	2623.80	4.00
4	N3	2623.80	4.00
5	N4	2623.86	43.70
6	N5	2777.92	197.76
7	N6	2778.09	-5.25
8	N7	2892.89	109.54
9	N8	2893.07	-25.05
10	N9	2972.09	53.97

**Fuente:** Autoría propia.

En el último tramo que se analiza con respecto al régimen permanente, se genera la presencia de presiones negativas, las cuales se ubican en el punto de entrada de las estaciones de bombeo B2 y B3. Esto se supone con la finalidad de los saltos de agua antes de llegar a la entrada de las bombas. La mayor potencia que se obtiene en todo el tramo pertenece al nudo N5, la cual se obtiene del punto de salida de la estación de bombeo B1.

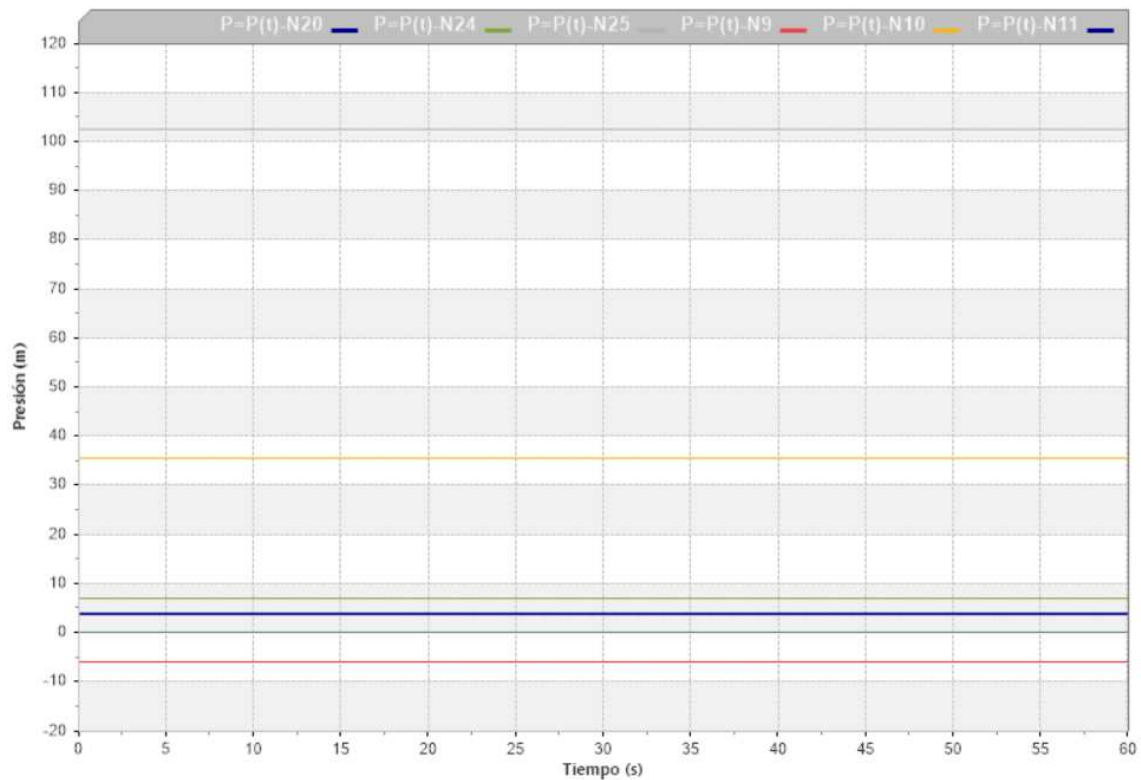
### 4.5.3 Análisis de régimen transitorio

Durante este análisis, se evalúa el comportamiento de las líneas de conducción durante un período de tiempo, con la intención de conocer el procedimiento de inicio y final durante el tiempo propuesto. Para el intervalo de tiempo para el cálculo en los conductos de presión, se establece un período de 0.05 segundos; el intervalo de tiempo para calcular conductos a lámina libre se considera un período de 0.5 segundos, y se establece un tiempo máximo de simulación de 60 segundos. Ya establecido estos tiempos, se procede con el análisis de presiones en cada nudo.

### **Tramo Cahzapugro – La Esperanza**

Al momento de graficar todos los nudos en una tabla, no se considera que existen cambios en la presión a lo largo del tiempo de simulación. Sin embargo, los cambios de presión son relativamente pequeños a lo largo del tiempo de ejecución del programa, por lo que se puede simplificar.

**Figura 46.** *Análisis de presiones en régimen transitorio del tramo Cahzapugro - La Esperanza.*



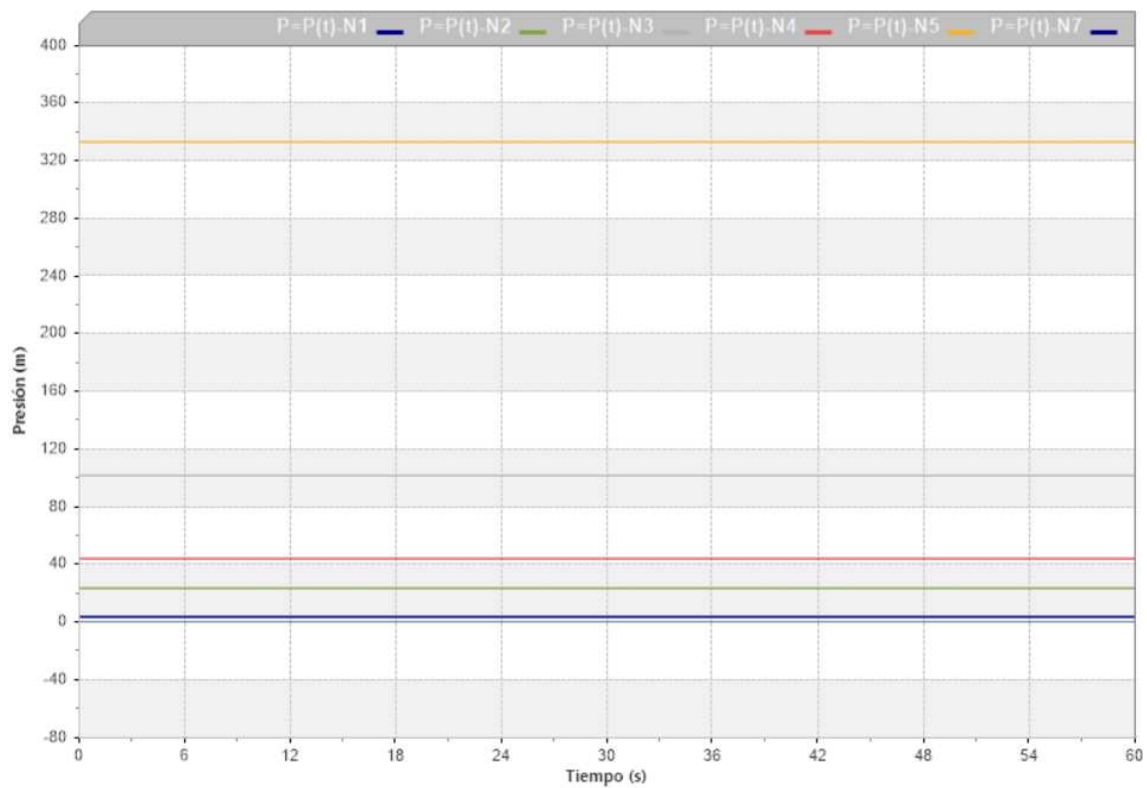
**Fuente:** Autoría propia.

Las presiones en la figura anterior varían por millonésimas, por lo que se grafica en Allievi como una recta continua a lo largo del tiempo de simulación. Cabe recalcar que las presiones que se registran en el régimen transitorio son iguales a los que se presentan en el régimen permanente, por lo que indica que en ambos regímenes sigue con el mismo comportamiento a lo largo del tramo.

### ***Tramo Collana – Primero de Enero***

Igualmente, como el tramo anterior, las presiones que circulan por los nudos son equivalentes a los analizados por el régimen permanente. Las presiones varían por millonésimas y cienmilésimas, en donde el programa los detecta como un valor constante a lo largo del tiempo de ejecución de la simulación. Por lo que, la gráfica quedará de la siguiente forma:

**Figura 47.** *Análisis de presiones en régimen transitorio del tramo Collana - Primero de Enero.*



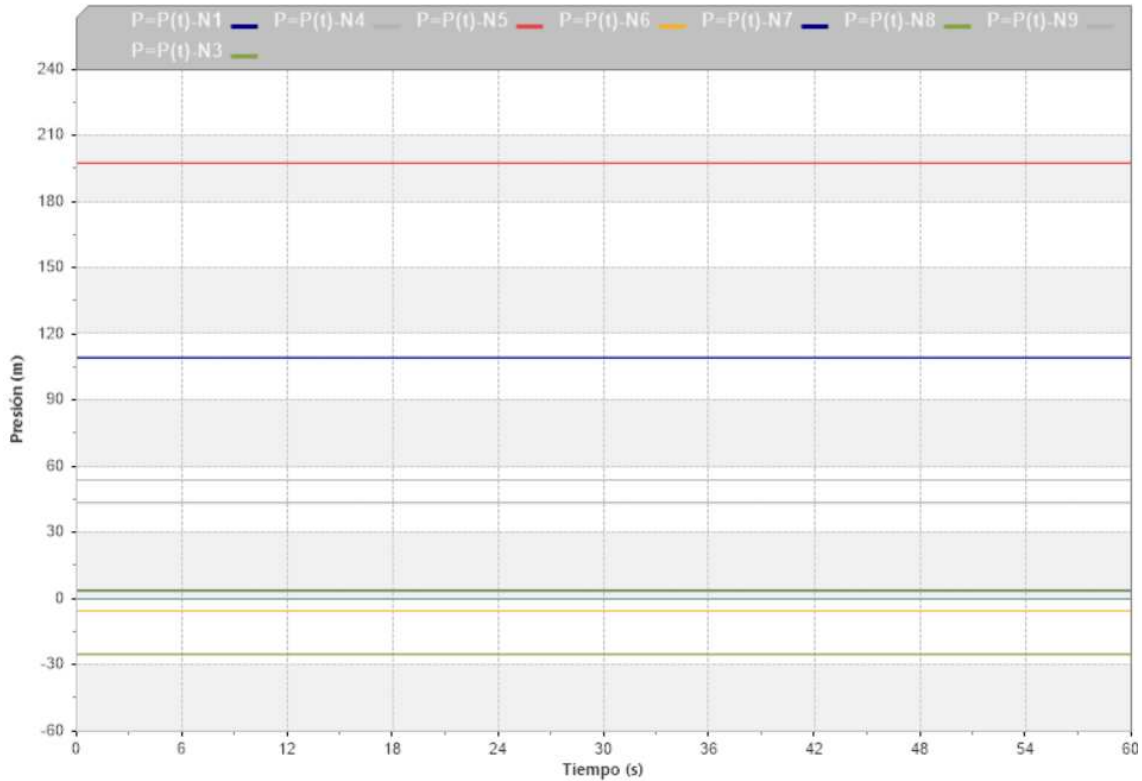
**Fuente:** Autoría propia.

### ***Tramo Collana – Tucto***

Las presiones que se están ejerciendo por el régimen transitorio no varían por valores muy elevados, así que se permanecen constantes a lo largo de todo el tiempo de simulación. Las

presiones ejecutadas en el régimen transitorio equivalen los valores del régimen permanente a lo largo del tiempo de ejecución del modelado.

**Figura 48.** *Análisis de presiones en régimen transitorio del tramo Collana - Tucto.*



**Fuente:** Autoría propia.

#### **4.6. Análisis de pérdidas a lo largo de las líneas de conducción**

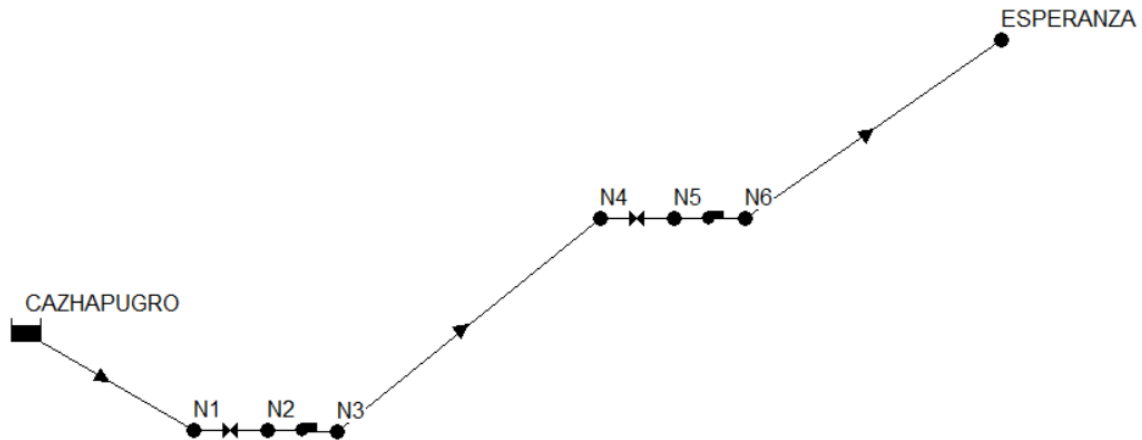
Debido a que se colocan accesorios dentro de las líneas de conducción para la generación de energía eléctrica y para el desplazamiento de agua potable hacia las comunidades a servir de la parroquia Ludo, se debe realizar un análisis para verificar la factibilidad de la generación eléctrica en el sistema mediante las pérdidas que surgen dentro de las conducciones. Las pérdidas que surgen por los accesorios disminuyen las alturas a las cuales el fluido llega a los puntos de análisis, por lo que es importante verificar su comportamiento.

Mediante el programa EPANET se realiza el análisis del comportamiento de las pérdidas y la altura del fluido en los tramos proyectados, con la intención de observar los niveles de fluido que llegan a cada nodo de análisis dentro de las tuberías.

#### 4.6.1 Tramo Cahzapugro – La Esperanza

De igual forma en que se realizó el análisis en Allievi, se traza la línea de conducción correspondiente al tramo que parte desde la comunidad de Cahzapugro hasta la comunidad de La Esperanza. Sin embargo, se realiza el análisis trazando una válvula antes de ingresar a las estaciones de bombeo; las válvulas son de tipo propósito general (GPV), las cuales sirven para la simulación de turbinas como en este caso las turbinas Pelton.

**Figura 49.** Trazado de tramo Cahzapugro - La Esperanza para análisis en EPANET.

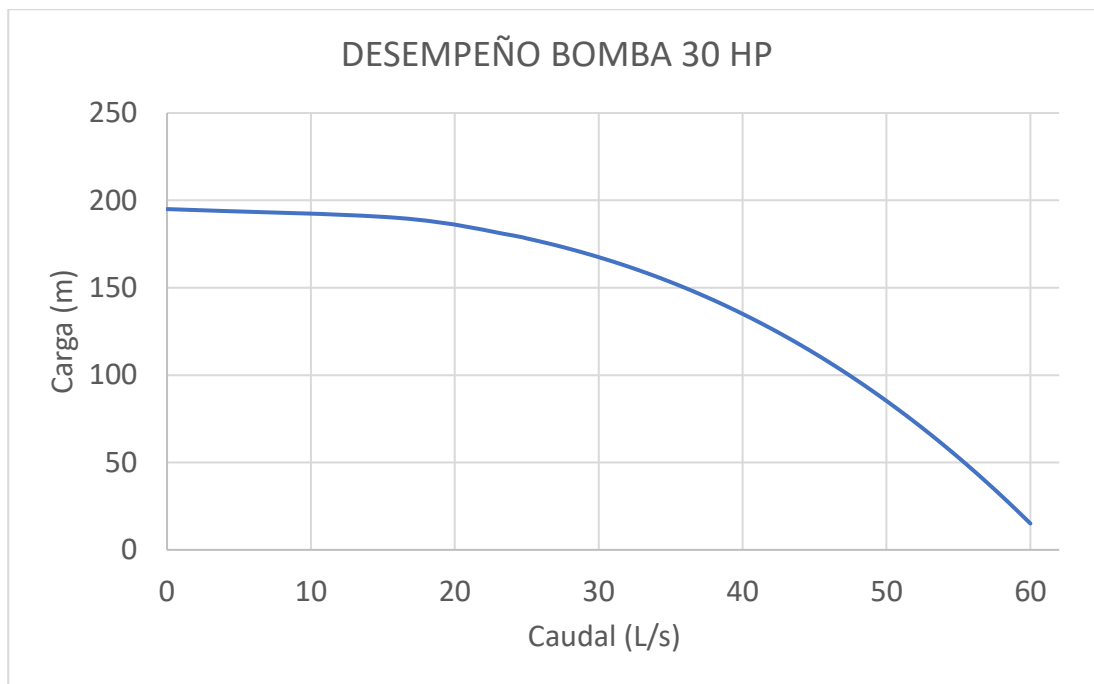


**Fuente:** Autoría propia.

A diferencia del software Allievi, EPANET requiere curvas características de las turbinas y bombas, las cuales indican su rendimiento y carga con respecto al caudal que circula por las tuberías. Los datos de las tuberías y nodos son idénticos a los datos ingresados en Allievi, considerando distinto la rugosidad de la tubería. Como EPANET está programado a trabajar la

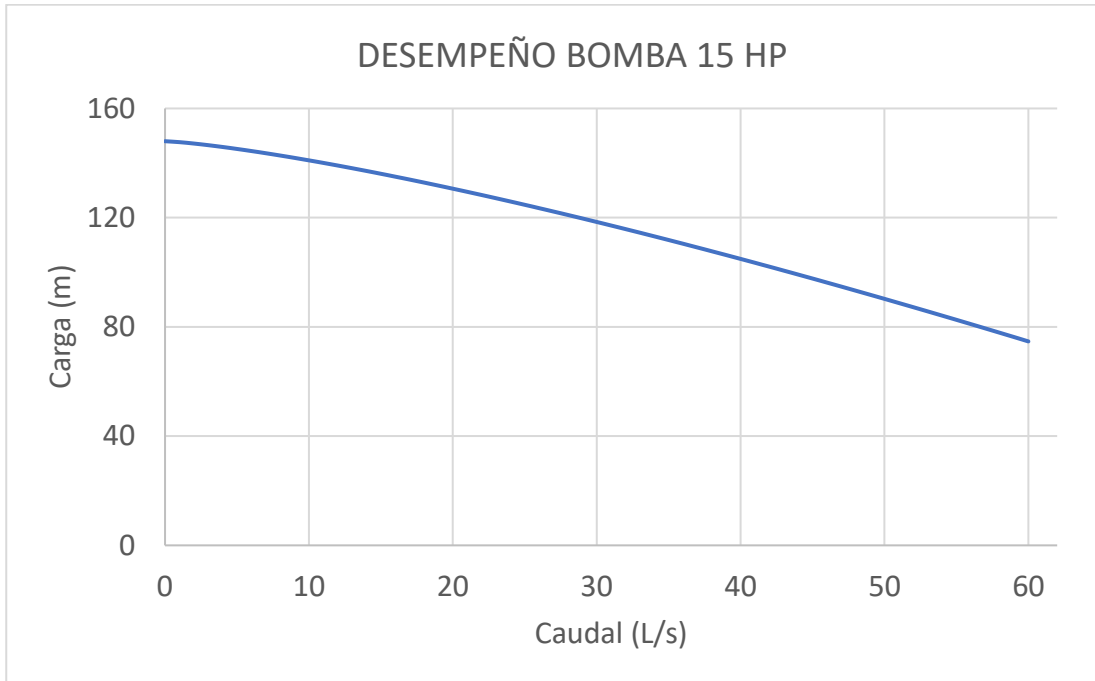
rugosidad mediante la ecuación de Darcy – Weisbach, el valor de rugosidad para las tuberías de acero será de 150. Las curvas características aplicadas en el sistema son los siguientes, para después realizar el análisis de pérdidas:

**Figura 50.** *Curva de desempeño de Bomba 30 HP.*



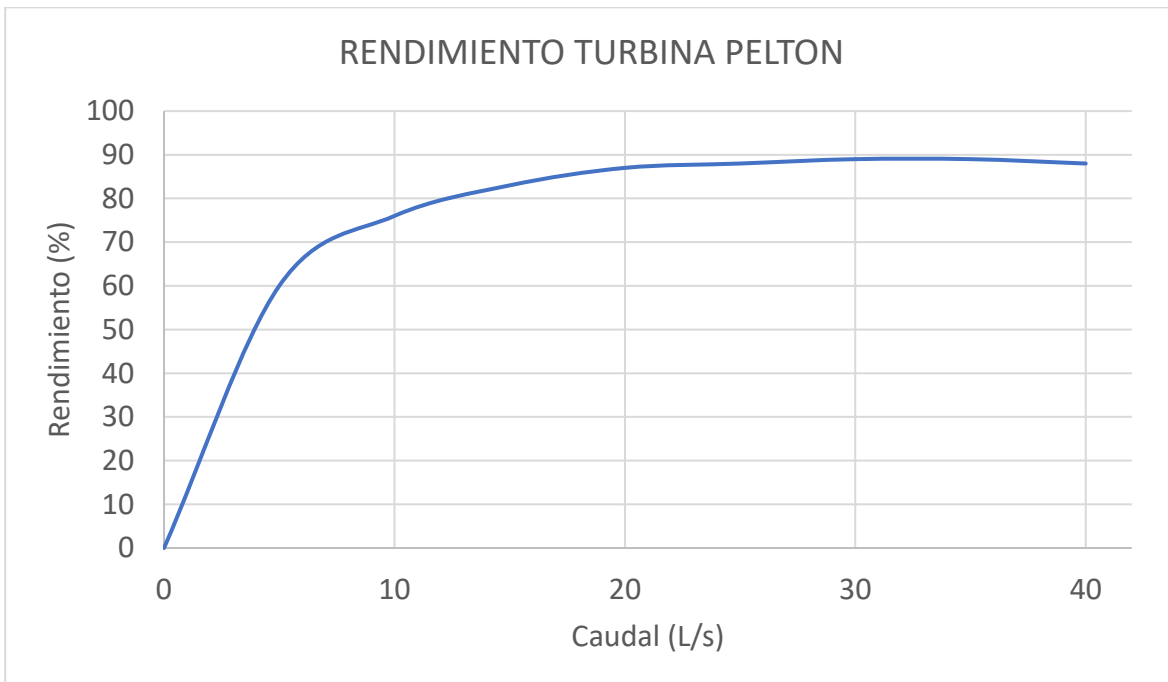
**Fuente:** Autoría propia.

**Figura 51.** Curva de desempeño de Bomba 15 HP.



**Fuente:** Autoría propia.

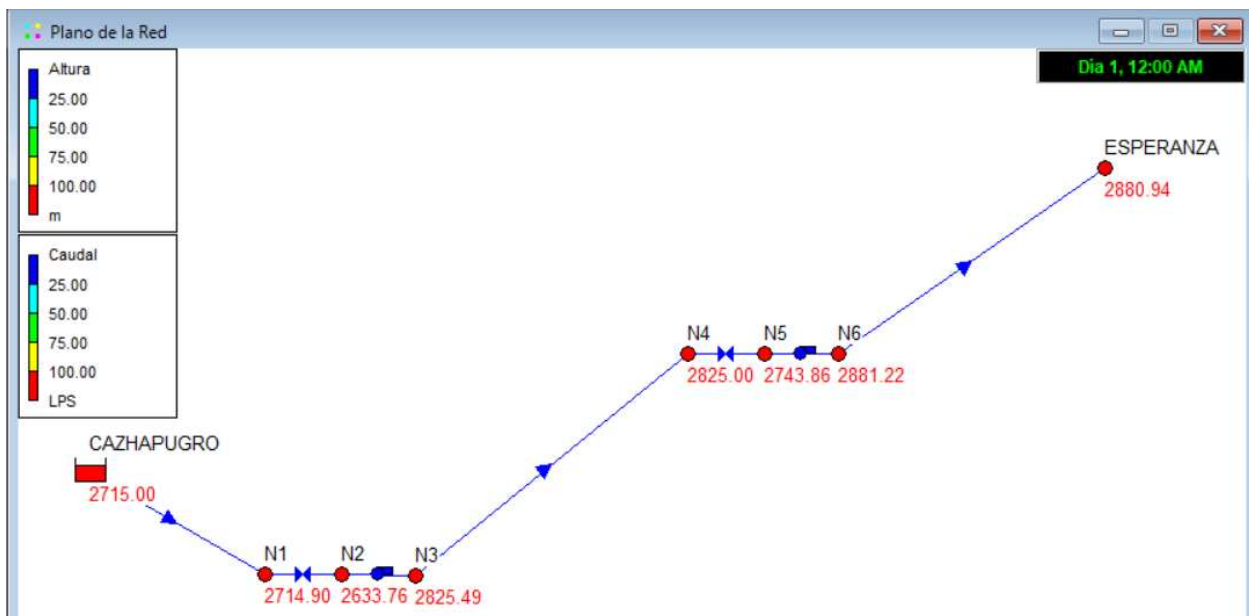
**Figura 52.** Curva de rendimiento de turbinas Pelton.



**Fuente:** Autoría propia.

Una vez establecidas las curvas características de los accesorios colocadas en la línea de conducción para la generación de energía y el desplazamiento de agua, se corre el programa con la finalidad de observar cómo se comporta el fluido debido a las pérdidas por accesorios y por las tuberías dentro del sistema.

**Figura 53.** *Análisis de altura alcanzada de fluido en EPANET del tramo Cazahapugro – La Esperanza.*



**Fuente:** Autoría propia.

Como se puede observar, a pesar de las colocaciones de las turbinas y bombas centrífugas de agua dentro de la línea de conducción, la altura que alcanza el fluido en el punto final es de 2880.94 metros, haciendo una comparativa entre las cotas de los nodos y la altura que el fluido alcanza, se obtiene lo siguiente.

**Tabla 16.** *Diferencia entre cotas y altura alcanzada por cambios de presión en tramo Cahzapugro - La Esperanza.*

<b>Nodo</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Altura Alcanzada (m)</b>
<b>CAZHAPUGRO</b>	2715.00	2715.00
<b>N1</b>	2712.00	2714.90
<b>N2</b>	2712.00	2633.76
<b>N3</b>	2712.00	2825.49
<b>N4</b>	2821.00	2825.00
<b>N5</b>	2821.00	2743.86
<b>N6</b>	2821.00	2881.22
<b>ESPERANZA</b>	2853.00	2880.94

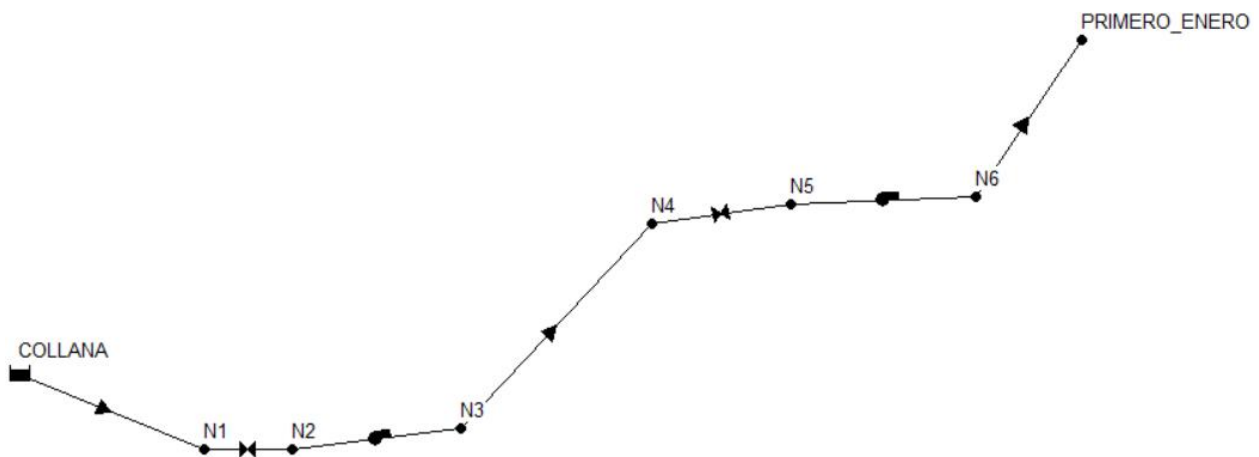
**Fuente:** Autoría propia.

Existen disminuciones de la altura debido a la pérdida de presión al momento de salir el fluido de las turbinas como se observan en los nodos N2 y N5, sin embargo, se recupera la presión en las tuberías al momento de egresar de las estaciones de bombeo. Esto hace que el fluido alcance la cota del punto de destino de la comunidad de La Esperanza, siendo de utilidad la colocación de estaciones de bombeo con las turbinas para la generación de electricidad.

#### 4.6.2 Tramo Collana – Primero de Enero

De igual forma que el tramo anterior, los datos pertenecientes a las tuberías y nodos permanecen constante a pesar de usar otro software para el análisis. La curva de rendimiento perteneciente a las turbinas Pelton implementadas en la línea de conducción no varía, por lo que se consideran los mismos valores de la Figura 52.

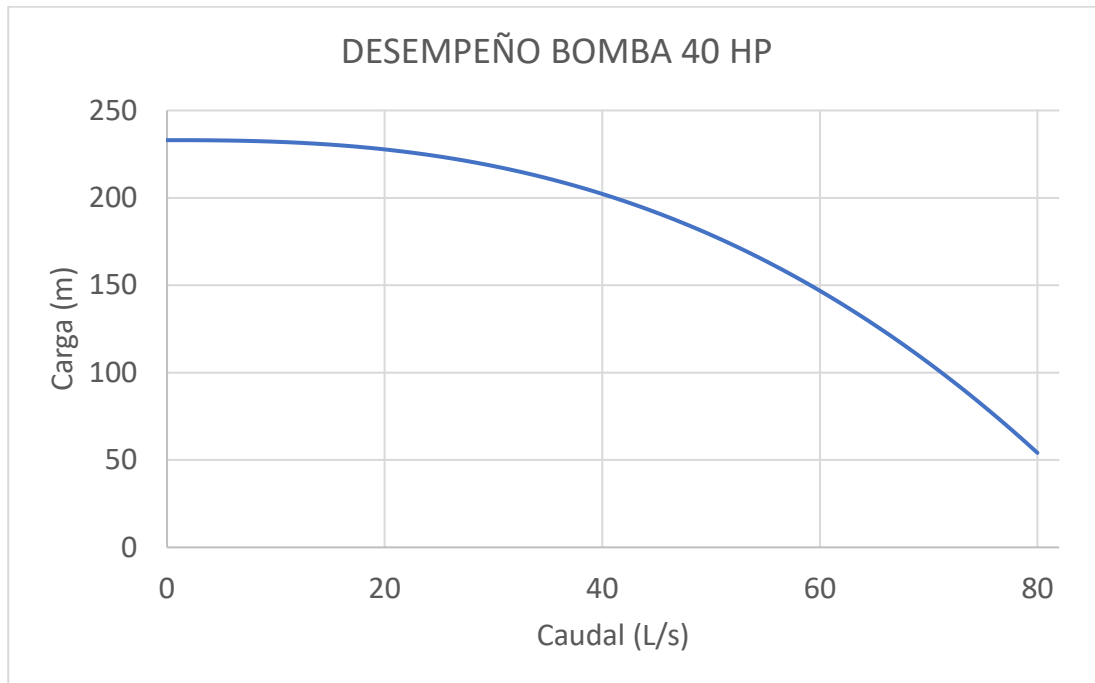
**Figura 54.** Trazado de tramo Collana - Primero de Enero para análisis en EPANET.



**Fuente:** Autoría propia.

En las estaciones de bombeo, se plantea a nivel comercial una bomba de 15 HP y de 40 Hp; la curva característica de la bomba de 15 HP permanece igual a la Figura 51, siendo implementada la siguiente curva para las bombas con potencia de 40 HP.

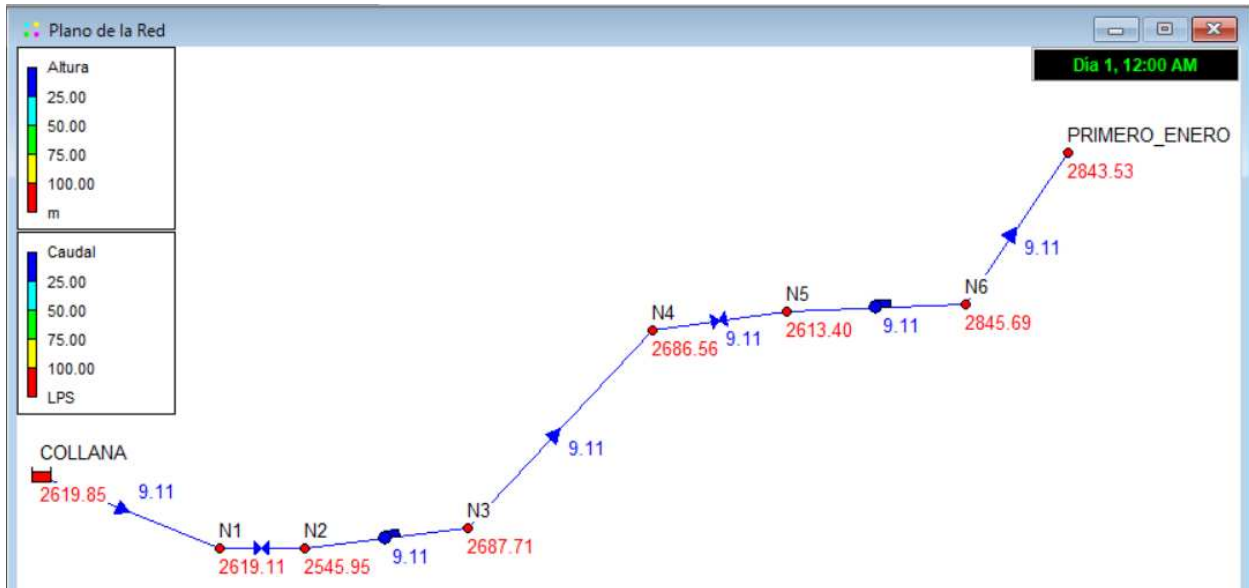
**Figura 55.** Curva de desempeño de Bomba 40 HP.



**Fuente:** Autoría propia.

Ya que se ingresan los datos de las curvas características a los accesorios de la línea de conducción, se corre el programa para analizar las presiones y las alturas que llegan a ser alcanzadas debido a las variaciones de presiones.

**Figura 56.** Análisis de altura alcanzada de fluido en EPANET del tramo Collana - Primero de Enero.



**Fuente:** Autoría propia.

Una vez obtenida los datos de las alturas alcanzadas en los nodos de análisis, se realiza una tabla para comparar la cota en que se encuentran los nodos de análisis y la altura dada en EPANET, para ver si el líquido vital alcanza las cotas requeridas o no.

**Tabla 17.** Diferencia entre cotas y altura alcanzada por cambios de presión en tramo Collana – Primero de Enero.

Nodo	Cota (m)	Altura Alcanzada (m)
COLLANA	2619.85	2619.85
N1	2600	2619.11
N2	2600	2545.95

<b>N3</b>	2600	2687.71
<b>N4</b>	2657.843	2686.56
<b>N5</b>	2657.843	2613.40
<b>N6</b>	2657.843	2845.69
<b>PRIMERO_ENERO</b>	2987.478	2843.53

---

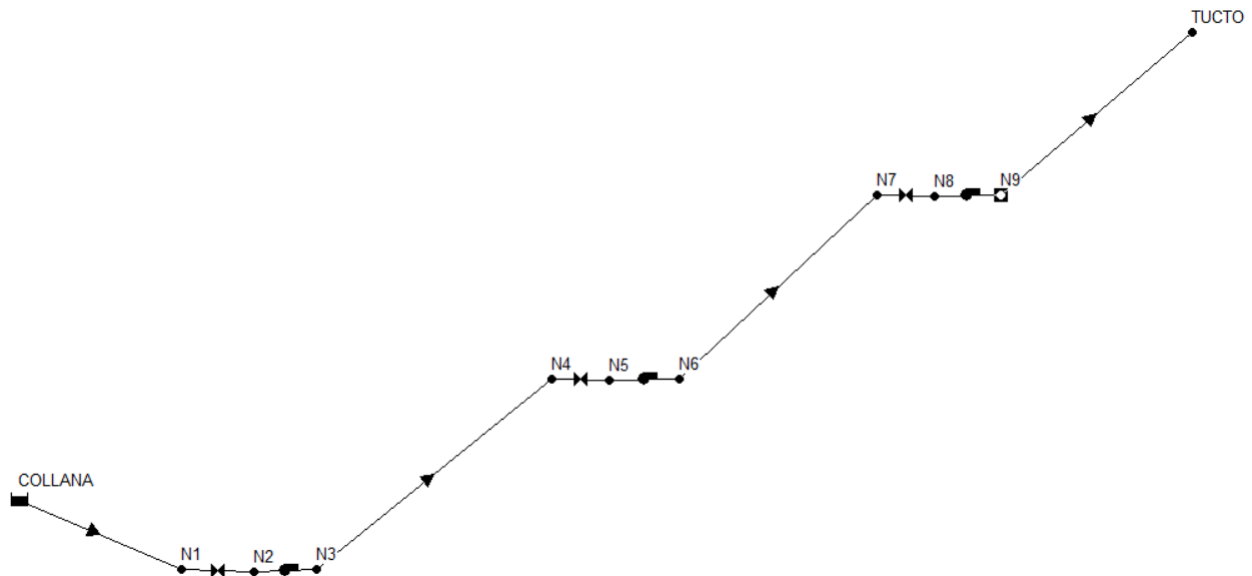
**Fuente:** Autoría propia.

Igual que en el tramo anterior, existen caídas de presión al momento en que el fluido egresa de las turbinas Pelton colocadas antes de las estaciones de bombeo, pero aumenta su presión al momento de salir de las bombas. En este caso, la altura alcanzada por la presión del fluido no llega a alcanzar la cota en donde se encuentra la comunidad de Primero de Enero, no logrando alcanzar por una altura de 143.95 metros. Esto indica que, debido a las pérdidas, el fluido no alcanza la cota designada al punto de destino por las turbinas colocadas en el sistema, impactando la línea de conducción y resultando no conveniente la generación de energía en el tramo.

#### **4.6.3 Tramo Collana – Tucto**

Los datos pertenecientes a las cotas de los nudos, longitud de tuberías, diámetros y rugosidad se mantiene constante con lo aplicado en Allievi, y la rugosidad igual al primer tramo, siendo de hierro fundido con un valor de 150. Se traza la ruta en EPANET para ingresar los datos pertenecientes a cada elemento hidráulico.

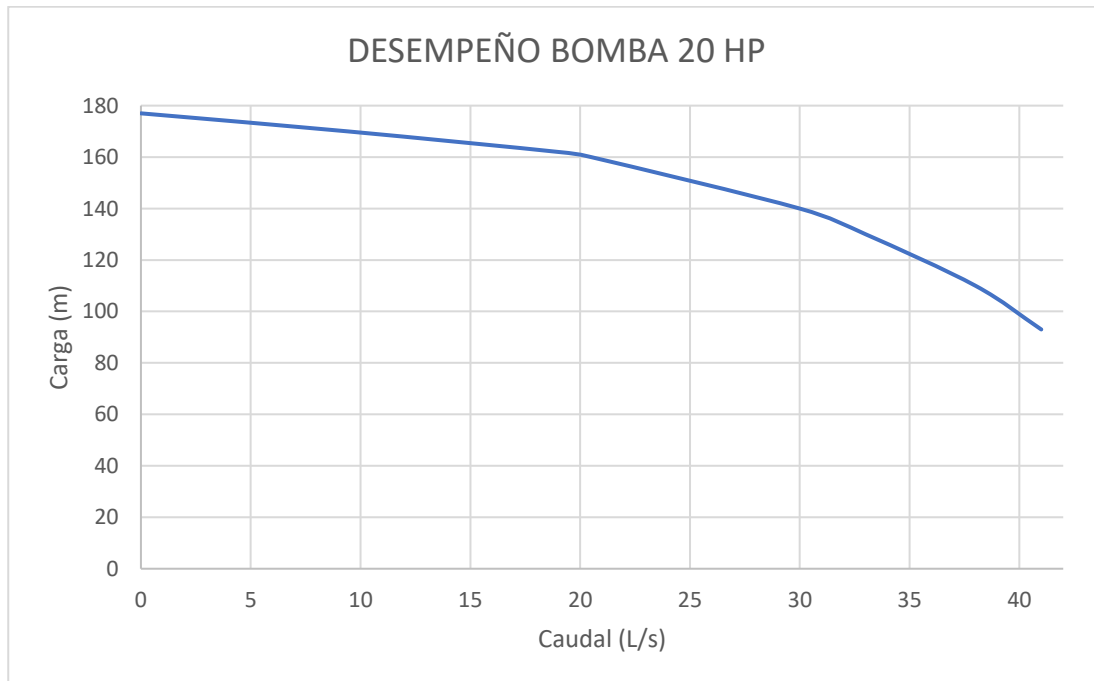
**Figura 57.** Trazado de tramo Collana - Tucto para análisis en EPANET.



**Fuente:** Autoría propia.

Con respecto a las curvas características de las turbinas y bombas, permanecen con los mismos valores aplicados en los análisis anteriores, debido a que son las mismas turbinas Pelton, y bombas de 15 y 30 HP. Sin embargo, la bomba B2 tiene una potencia de 20 HP, por lo que se le asigna la siguiente curva característica según su desempeño.

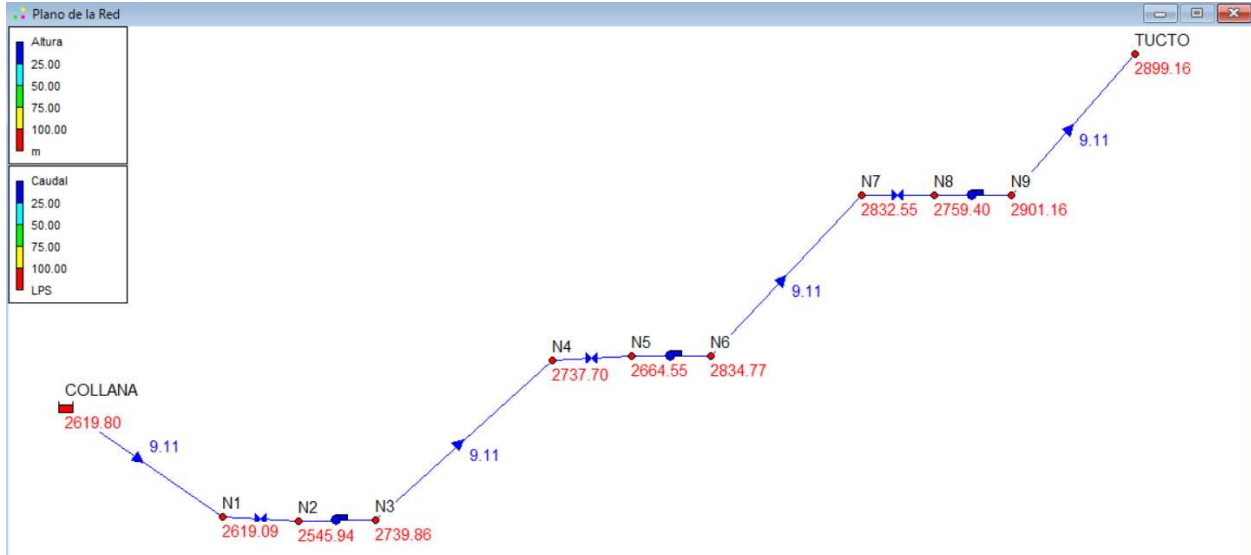
**Figura 58.** Curva de desempeño de Bomba 20 HP.



**Fuente:** Autoría propia.

Ya que se ingresan las curvas características de los accesorios hidráulicos, como el de los demás elementos de análisis, se procede a correr el programa para analizar la altura que alcanza el fluido a través de las presiones generadas en las tuberías.

**Figura 59.** Análisis de altura alcanzada de fluido en EPANET del tramo Collana - Tucto.



**Fuente:** Autoría propia.

Con los datos obtenidos del programa y las cotas pertenecientes a la topografía del terreno, se realiza una comparativa para indicar si el fluido alcanza la comunidad de Tucto con la presión que se ejerce dentro de la línea de conducción.

**Tabla 18.** Diferencia entre cotas y altura alcanzada por cambios de presión en tramo Collana - Tucto.

Nodo	Cota (m)	Altura Alcanzada (m)
<b>COLLANA</b>	2619.803	2619.80
<b>N1</b>	2580.16	2619.09
<b>N2</b>	2580.16	2545.94
<b>N3</b>	2580.16	2739.86

<b>N4</b>	2783.342	2737.70
<b>N5</b>	2783.342	2664.55
<b>N6</b>	2783.342	2834.77
<b>N7</b>	2918.118	2832.55
<b>N8</b>	2918.118	2759.40
<b>N9</b>	2918.118	2901.16
<b>TUCTO</b>	2968.252	2899.16

---

**Fuente:** Autoría propia.

Debido a la colocación de turbinas en la línea de conducción, disminuye la presión dentro de las tuberías, haciendo que el fluido no circule hasta la comunidad de Tucto. Esto quiere decir que no resulta conveniente la aplicación de turbinas para la generación de electricidad dentro de la línea de conducción del tramo.

#### **4.7. Análisis de producción de energía vs demanda**

Para que el proyecto sea viable, se debe realizar un análisis de acuerdo a la potencia que se requiere para llevar a cabo los saltos de agua y la potencia que se puede generar debido a los datos topográficos e hidráulicos pertenecientes al sector de estudio. Por ende, se realizan tablas para comparar los valores obtenidos tras los cálculos, para verificar si la energía generada podrá abastecer las estaciones de bombeo en cada una de los tramos.

Cabe recalcar que, al momento de realizar el análisis de la producción de energía, se considera el rendimiento de las turbinas tipo Pelton de un 90%, debido a las pérdidas que se generan al

momento de ingresar el fluido a las turbinas. El porcentaje del rendimiento se describe mejor en el punto 4.1.4, y los cálculos se encuentran en el punto 4.4.

#### 4.7.1 Cazhapugro – La Esperanza

**Tabla 19.** *Potencia requerida vs potencia generada por turbinas en tramo Cazhapugro - La Esperanza.*

<b>Estación</b>	<b>Potencia requerida (HP)</b>	<b>Potencia generada (HP)</b>
<b>B1</b>	29.685	22.526
<b>B2</b>	12.888	4.594
<b>TOTAL</b>	42.573	27.12

**Fuente:** Autoría propia.

Al momento de comparar el total de la potencia requerida y la potencia generada en el tramo Cazhapugro – La Esperanza, se puede visualizar que, con los datos hidráulicos presentes, no es suficiente para alimentar las estaciones de bombeo presentes en la ruta. Si analizamos la potencia generada con respecto a la potencia requerida, solamente se abarca un 63.7% de la energía eléctrica requerida para llevar a cabo los saltos de agua necesarios en la ruta hacia la comunidad de La Esperanza.

Las posibles soluciones a la complementación de energía necesaria para llevar a cabo los trayectos serían entre la implementación de otra fuente de energía renovable, o complementar con la energía del estado.

#### 4.7.2 Collana – Primero de Enero

**Tabla 20.** *Potencia requerida vs potencia generada por turbinas en tramo Collana – Primero de Enero.*

<b>Estación</b>	<b>Potencia requerida (HP)</b>	<b>Potencia generada (HP)</b>
<b>B1</b>	10.686	27.145
<b>B2</b>	39.492	3.38
<b>TOTAL</b>	50.178	30.525

**Fuente:** Autoría propia.

Para la primera estación B1, si se logra generar la potencia requerida para llevar a cabo el salto de agua de 250 metros con los datos de caudal; sin embargo, para la estación B2 no se cumple la potencia generada para llevar a cabo el salto de agua necesario para servir el líquido vital hacia la comunidad de Primero de Enero. Aún si se transfiere la energía sobrante de la estación B1 hasta la estación B2, no abastece para llevar a cabo el salto requerido.

En cuestiones de producción con respecto a la demanda de energía eléctrica, solamente se produce un 60.83% de la energía eléctrica total que se requiere en el sistema para transportar el agua desde la comunidad de Collana hasta Primero de Enero.

### 4.7.3 Collana – Tucto

**Tabla 21.** *Potencia requerida vs potencia generada por turbinas en tramo Collana – Tucto.*

<b>Estación</b>	<b>Potencia requerida (HP)</b>	<b>Potencia generada (HP)</b>
<b>B1</b>	25.381	29.284
<b>B2</b>	18.912	0.942
<b>B3</b>	13.019	2.489
<b>TOTAL</b>	57.312	32.715

**Fuente:** Autoría propia.

Entre los tres tramos analizados, este tramo es el que menor energía eléctrica produce en comparación a los demás trayectos. Al igual que el tramo Collana – Primero de Enero, en la estación B1 se produce la energía suficiente para llevar a cabo el salto de agua requerido hasta llegar a la siguiente estación de bombeo. Sin embargo, como en la ruta anterior, las demás estaciones no producen la energía eléctrica requerida para llevar a cabo los saltos de agua necesarios para alcanzar las siguientes estaciones y la comunidad de Tucto.

En esta ruta, se produce solamente un 57.08% de la potencia requerida para transporte el agua por las líneas de conducción desde Collana hasta la comunidad de Tucto. Por lo que, ya después de haber analizado las 3 rutas estudiadas, se debe implementar otra fuente de energía eléctrica para llevar a cabo los trayectos planteados y necesarios.

### 4.8. Análisis de alternativas para producción de energía eléctrica

Como la producción de energía eléctrica debido a las turbinas no abarca en su totalidad a las estaciones de bombeo ubicadas en cada una de las rutas, se debe optar por otra fuente de

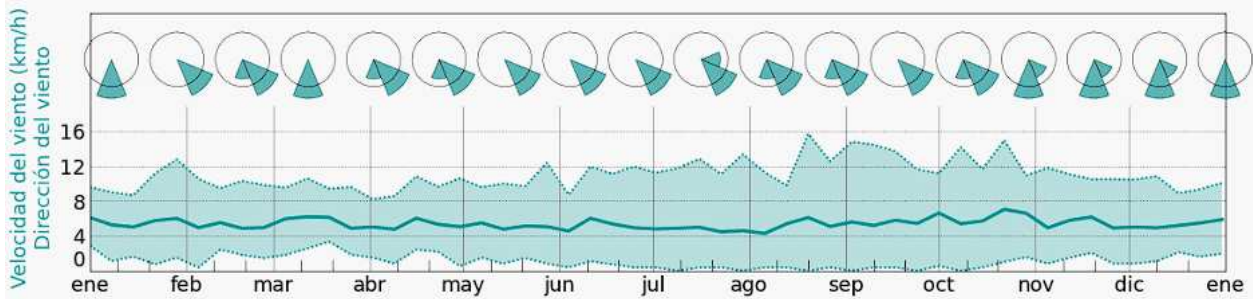
alimentación para las bombas hidráulicas. Se debe analizar las posibles alternativas o adiciones para la energía eléctrica que requieren las bombas para operar y llevar a cabo los saltos de agua, abasteciendo el líquido vital hacia las comunidades de La Esperanza, Primero de Enero, y Tucto.

También, al momento de analizar las alternativas para la producción de energía eléctrica, se debe considerar que, por tratarse de la parroquia Ludo como una de las parroquias rurales del cantón Sígsig, el Estado no le proporciona el presupuesto suficiente para llevar a cabo el proyecto de red de distribución de agua potable hacia las comunidades rurales de estudio del cantón. Ya destacado los temas de presupuesto, se plantean las siguientes alternativas para la producción de energía eléctrica para el proyecto de riego Minas Ludo.

#### 4.8.1 Energía eólica

Debido a que la parroquia Ludo y las comunidades a servir se encuentran en una zona montañosa, perteneciendo a la región Sierra, el viento navega de manera constante y de forma intensa. Las montañas forman un pasillo casi obligado para la circulación del viento, siendo una fuente inagotable de energía como alternativa para la producción de energía eléctrica. Para plantear esto se debe analizar la velocidad del viento que circula por el área del estudio. En este caso, se consultarán los datos de velocidad del viento pertenecientes al cantón Sígsig.

**Figura 60.** *Velocidad del viento del cantón Sígsig.*



**Fuente:** (*Archivo meteorológico Sigsig, s/f*).

Las velocidades altas del viento que se presentan en el sector garantizan una generación constante de energía eléctrica y, según se esperaría, valores altos de potencia para la producción de energía eléctrica. Para el cálculo de la potencia teórica de la turbina eólica, se considera la ecuación 2, en donde se necesitan los valores del área del rotor, la densidad de potencia, y la velocidad en que circula el viento.

El área de rotor dependerá de la longitud de las palas implementadas en las turbinas eólicas, el valor de radio de las palas de la hélice se considera de acuerdo a una hélice de 30 kW realizado por el fabricante Zenia Energy. El aerogenerador tiene 3 hojas con un diámetro de 13.8 metros, la cual el diámetro de la turbina comercial se considera para el cálculo de potencia que produce el aerogenerador. Para la densidad de potencia eólica se deberá calcular con la ecuación 3, considerando la densidad del viento de 1.2 kgf/m<sup>3</sup>, y se considera la velocidad del viento el máximo de la figura 77.

**Figura 61.** Cálculo de densidad de potencia y potencia generada por turbinas eólicas.

**DATOS**

$$v_W := 16 \frac{km}{hr} = 4.444 \frac{m}{s}$$
$$\rho := 1.2 \frac{kg}{m^3}$$
$$c_p := 0.5$$
$$d_i := 13.8 \text{ m}$$
  
$$A_R := \pi \cdot (d_i)^2 = 598.285 \text{ m}^2$$
$$p := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_W^3 = 0.053 \frac{kW}{m^2}$$
  
$$Pot := A_R \cdot p \cdot c_p = 15.757 \text{ kW}$$
$$Pot = 21.131 \text{ hp}$$

**Fuente:** Autoría propia.

La potencia que se puede generar con el diámetro comercial llega hasta una potencia de 21.13 caballos de fuerza, el cual puede aumentar dependiendo del diámetro del rotor. Sin embargo, si se considera el aumento de diámetro de la hélice rotor, aumentaría el presupuesto que se tendría para las comunidades del proyecto.

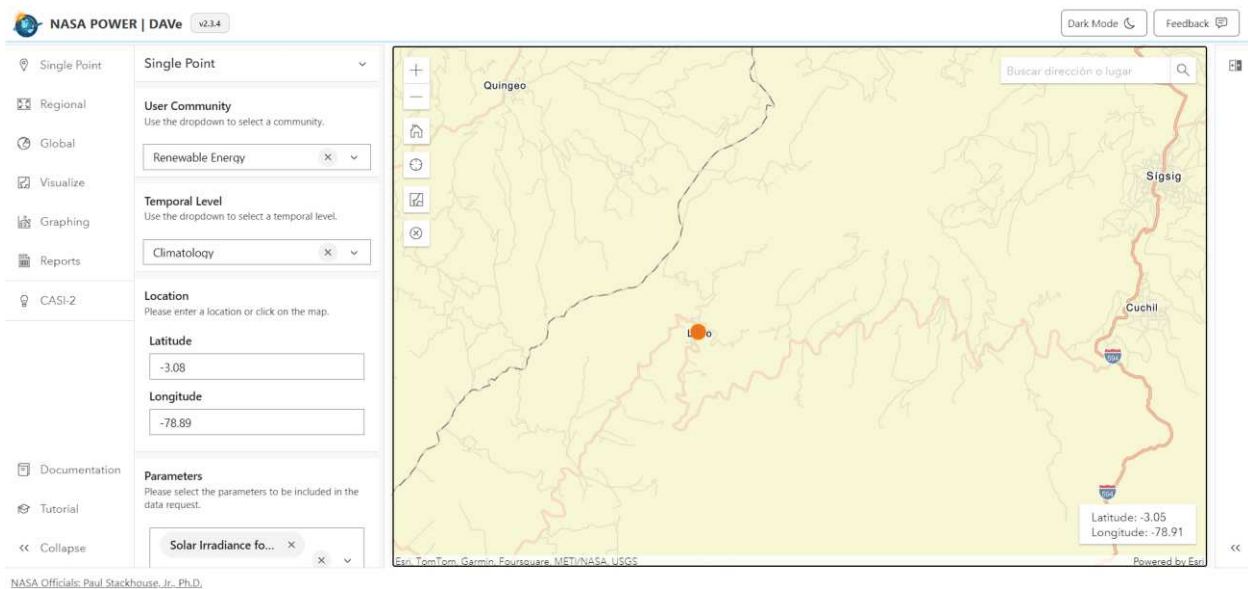
#### 4.8.2 Energía solar

Debido a que en las zonas montañosas es donde recibe mayor sol, se opta también por la energía solar como una alternativa para la producción de energía eléctrica para las estaciones de bombeo. Para llevar a cabo los cálculos de la potencia que puede llegar a generarse con la energía solar, se debe conseguir las horas solares pico, en donde es la energía que se recibe en horas por una unidad

de superficie. Esta no es igual en todas las zonas, ya que depende de la localización y la época del año.

Para obtener el valor de hora solar pico perteneciente a la zona, se extraen los datos de hora pico solar a nivel mensual perteneciente a la página de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), bajo el apartado de Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) con su geovisor Data Access Viewer Enhanced (DAVe).

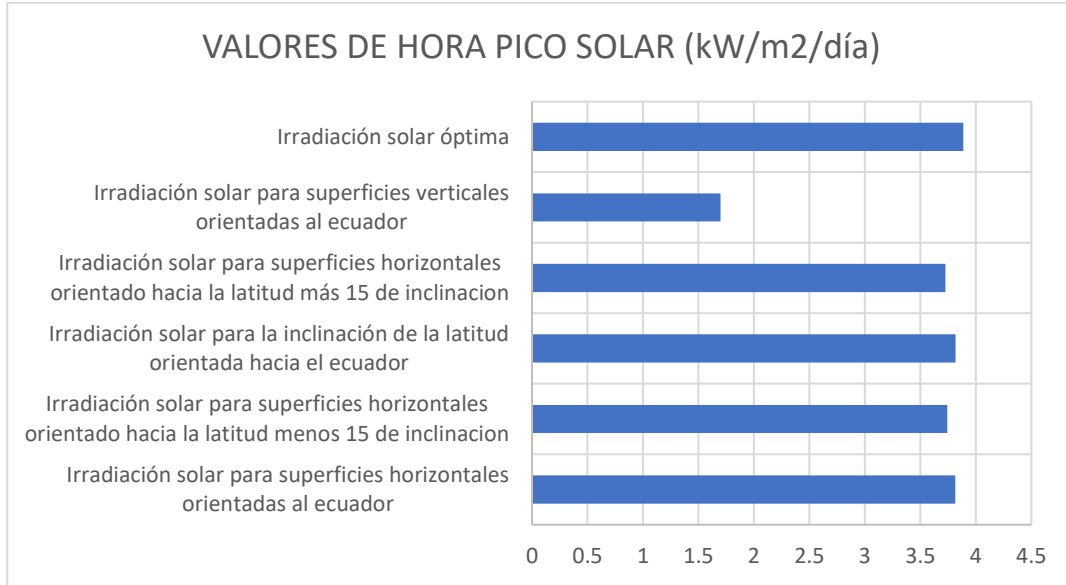
**Figura 62.** Portal del DAVe correspondiente a la NASA.



**Fuente:** (National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2013).

Mediante los datos cargados al portal de la NASA, se obtiene los datos de la radiación solar teniendo en cuenta todas las direcciones posibles, las cuales se consideran los promedios anuales de cada dirección para tomar el valor de hora pico anual válido para los cálculos de potencia generada por los paneles solares.

**Figura 63.** *Valores de hora pico solar dependiendo de la orientación de la superficie.*



**Fuente:** (National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2013).

De los valores de irradiación solar obtenidos por la NASA, se escoge el mayor de los parámetros evaluados siendo la irradiación solar para la inclinación de la latitud orientada hacia el ecuador, teniendo un valor de 3.8875 kW/m<sup>2</sup>/día, el cual será usado para el cálculo de potencia generada por la energía proveniente del sol. A su vez, se requiere el consumo diario de electricidad requerida, para ello se requiere a su vez el consumo diario de electricidad para determinar la potencia generada por la energía fotovoltaica y la energía térmica mediante paneles solares.

**Figura 64.** Cálculo de energía solar fotovoltaico.

$$\begin{aligned} & \text{DATOS} \\ & \eta := 0.77 \\ & HSP := 3.8875 \text{ hr} \\ & Pot_{req\_max} := 39.492 \text{ hp} = 29449.179 \text{ W} \\ & Cons_{Dia} := Pot_{req\_max} \cdot 24 \text{ hr} = 706.78 \text{ kW} \cdot \text{hr} \\ & PFV := \frac{Cons_{Dia}}{HSP \cdot \eta} = 236.115 \text{ kW} \\ & PFV = 316.635 \text{ hp} \end{aligned}$$

**Fuente:** Autoría propia.

Por lo que se puede observar, la energía fotovoltaica llega a producirse hasta 288.4 kilowatts (kW), o también traduciéndose a 386.27 caballos de fuerza al momento de considerar la potencia máxima requerida en el proyecto. La potencia que se produce no indica que solamente un panel puede llevar a cabo esta acción, sino que se requiere la implementación de varios paneles dependiendo de la potencia de cada panel. En este caso, se analiza un módulo fotovoltaico que tenga una capacidad de producir 450 watts (W).

Al momento de dividir la potencia fotovoltaica entre la capacidad de un módulo fotovoltaico, se deduce que se requieren 641 módulos, requiriendo un alto presupuesto y bastante superficie de terreno para llevar a cabo la instalación de paneles fotovoltaicos. En cambio, al momento de analizar la energía solar térmica, para producir tales niveles de energía se requieren altas temperaturas para que las estaciones de bombeo laboren sin problemas, por lo que no se opta la alternativa de energía solar.

### **4.8.3 Otras alternativas**

No se consideran otras alternativas para la producción de energía eléctrica debido a que, para la producción de biomasa, se requerirá grandes cantidades de biocombustibles sólidos para llevar a cabo las grandes potencias que necesitan las estaciones de bombeo. Otras fuentes de energía renovables se descartan como la energía por marea debido a las distancias en que se encuentra el océano para producir tales energías. Las demás fuentes de energía se descartan debido a procesos complicados para su instalación considerando la topografía del sitio del proyecto.

### **4.9. Mejor alternativa de producción de energía**

Analizando las alternativas planteadas para la producción de energía eléctrica, se puede deducir que la energía eólica es la mejor solución de energía renovable apto para el proyecto de riego Minas Ludo. Debido a que circulan niveles altos de velocidad del viento por las zonas montañosas pertenecientes a la región del altiplano ecuatoriano, se generan vientos constantes las cuales potenciarán a las estaciones de bombeo y enviar el agua hacia las comunidades rurales.

Sin embargo, el diámetro del rotor de las hélices tendría que variar según las potencias que se requieren en cada estación de bombeo. Se diseña de acuerdo a las potencias requeridas, siempre considerando la potencia producida un poco mayor a la requerida por cuestiones de pérdidas que pueden llevarse a cabo al momento de transportar la energía eléctrica desde el generador hacia la estación de bombeo.

**Figura 65.** *Determinación de diámetros de rotor para generar energía eólica para tramo Cahzapugro - La Esperanza.*

Tramo Cahzapugro - La Esperanza	
$Pot_{B1} := 29.685 \text{ hp}$	$d_{i_{B1}} := 16.5 \text{ m}$
	$A_{R_{B1}} := \pi \cdot (d_{i_{B1}})^2 = 855.299 \text{ m}^2$
	$Pot_{W_{B1}} := A_{R_{B1}} \cdot p \cdot c_p = 30.208 \text{ hp}$
$Pot_{B2} := 12.888 \text{ hp}$	$d_{i_{B2}} := 11 \text{ m}$
	$A_{R_{B2}} := \pi \cdot (d_{i_{B2}})^2 = 380.133 \text{ m}^2$
	$Pot_{W_{B2}} := A_{R_{B2}} \cdot p \cdot c_p = 13.426 \text{ hp}$

**Fuente:** Autoría propia.

**Figura 66.** *Determinación de diámetros de rotor para generar energía eólica para tramo Collana - Primero de Enero.*

Tramo Collana - Primero de Enero	
$Pot_{B1} := 10.686 \text{ hp}$	$d_{i_{B1}} := 10.25 \text{ m}$
	$A_{R_{B1}} := \pi \cdot (d_{i_{B1}})^2 = 330.064 \text{ m}^2$
	$Pot_{W_{B1}} := A_{R_{B1}} \cdot p \cdot c_p = 11.658 \text{ hp}$
$Pot_{B2} := 39.492 \text{ hp}$	$d_{i_{B2}} := 19.25 \text{ m}$
	$A_{R_{B2}} := \pi \cdot (d_{i_{B2}})^2 = (1.164 \cdot 10^3) \text{ m}^2$
	$Pot_{W_{B2}} := A_{R_{B2}} \cdot p \cdot c_p = 41.117 \text{ hp}$

**Fuente:** Autoría propia.

**Figura 67.** Determinación de diámetros de rotor para generar energía eólica para tramo Collana - Tucto.

Tramo Collana - Tucto	
$Pot_{B1} := 25.381 \text{ hp}$	$d_{i_{B1}} := 15.5 \text{ m}$
	$A_{R_{B1}} := \pi \cdot (d_{i_{B1}})^2 = 754.768 \text{ m}^2$
	$Pot_{W_{B1}} := A_{R_{B1}} \cdot p \cdot c_p = 26.658 \text{ hp}$
$Pot_{B2} := 18.912 \text{ hp}$	$d_{i_{B2}} := 13.5 \text{ m}$
	$A_{R_{B2}} := \pi \cdot (d_{i_{B2}})^2 = 572.555 \text{ m}^2$
	$Pot_{W_{B2}} := A_{R_{B2}} \cdot p \cdot c_p = 20.222 \text{ hp}$
$Pot_{B3} := 13.019 \text{ hp}$	$d_{i_{B3}} := 12 \text{ m}$
	$A_{R_{B3}} := \pi \cdot (d_{i_{B3}})^2 = 452.389 \text{ m}^2$
	$Pot_{W_{B3}} := A_{R_{B3}} \cdot p \cdot c_p = 15.978 \text{ hp}$

**Fuente:** Autoría propia.

Ya calculado los diámetros del rotor de las hélices requeridas para la producción de energía suficiente para alimentar el proyecto, se plantea como alternativa principal la energía eólica para llevar a cabo el proyecto de riego hacia las comunidades de La Esperanza, Primero de Enero y Tucto.

#### 4.10. Complementación de necesidad de energía con energía del estado

Debido a que la energía eléctrica generada por el sistema de riego no satisface la demanda de energía requerida para impulsar el agua hacia las comunidades rurales pertenecientes de la parroquia Ludo, se opta por la complementación de la necesidad de energía con la energía proveniente del estado. Para el caso del cantón Sígsig, la empresa pública encargada para brindar

los servicios de energía eléctrica es la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. (CENTROSUR), la cual se brinda sus servicios a una gran parte de las provincias del Azuay y Cañar.

Para analizar el complemento del Estado requerido para abastecer el sistema de riego para el proyecto, se aplica la potencia comercial de las estaciones de bombeo. Una vez obtenida la suma de las potencias comerciales, se le resta la potencia generada a partir de los datos hidráulicos, dando como resultado la potencia que sería complementada de la energía eléctrica producida por CENTROSUR, además de una estimación de costos de cuánto sería el valor de energía eléctrica a pagar hacia la empresa por la complementación de energía.

**Tabla 22.** *Análisis de potencia generada, potencia requerida y potencia comercial de tramo Cahzapugro - La Esperanza.*

<b>Nombre de estación</b>	<b>Potencia generada (hp)</b>	<b>Potencia requerida (hp)</b>	<b>Potencia comercial (hp)</b>
<b>B1</b>	22.526	29.685	30.000
<b>B2</b>	4.594	12.888	15.000
<b>TOTAL</b>	27.120	42.573	45.000

**Fuente:** Autoría propia.

Al momento de restar la potencia comercial y la potencia generada en el tramo, se obtiene un valor de 17.88 caballos de fuerza, o también convertido en 13.34 kW, cuya potencia será complementada por la empresa eléctrica CENTROSUR. Este valor de potencia se debe convertir

en consumo horario de energía, donde se multiplica la potencia que necesita ser complementada por una hora de consumo, dando un valor de consumo de 13.34 kWh.

**Tabla 23.** *Análisis de potencia generada, potencia requerida y potencia comercial de tramo Collana - Primero de Enero.*

<b>Nombre de estación</b>	<b>Potencia generada (hp)</b>	<b>Potencia requerida (hp)</b>	<b>Potencia comercial (hp)</b>
<b>B1</b>	27.145	10.686	12.500
<b>B2</b>	3.380	39.492	40.000
<b>TOTAL</b>	30.525	50.178	52.500

**Fuente:** Autoría propia.

Al considerar la diferencia entre la potencia comercial y la potencia generada que se produce en la línea de conducción, se obtiene una potencia de 21.975 hp, o 16.387 kW. Este valor de potencia se transforma en consumo horario eléctrico, el cual llega a ser 16.387 kWh.

**Tabla 24.** *Análisis de potencia generada, potencia requerida y potencia comercial de tramo Collana - Tucto.*

<b>Nombre de estación</b>	<b>Potencia generada (hp)</b>	<b>Potencia requerida (hp)</b>	<b>Potencia comercial (hp)</b>
<b>B1</b>	29.284	25.381	30.000
<b>B2</b>	0.942	18.912	20.000

<b>B3</b>	2.489	13.019	15.000
<b>TOTAL</b>	32.715	57.312	65.000

**Fuente:** Autoría propia.

Tras calcular la diferencia entre la potencia comercial y la potencia generada, se obtiene una potencia de 32.285 caballos de fuerza, o 24.075 kW de potencia que debe ser complementada por la empresa eléctrica CENTROSUR. Al momento de transformar la potencia en consumo horario de energía, se consigue un total de 24.075 kWh faltante para alimentar todo el sistema del tramo Collana – Tucto.

Una vez determinada los valores de consumo faltante de cada tramo, se realiza la suma de los tramos para determinar la cantidad total de energía que CENTROSUR deberá implementar para llevar a cabo el sistema de riego perteneciente de la parroquia Ludo. Los datos de consumo horario generados y complementados son los siguientes, transformados desde caballos de fuerza hasta kilowatts, y transformar cuya potencia en consumo horario multiplicando por un tiempo unitario de una hora:

**Tabla 25.** *Comparación de consumo horario generado por las turbinas hidráulicas y el consumo horario debido a las bombas comerciales.*

<b>Tramo</b>	<b>Consumo horario generado (kWh)</b>	<b>Consumo horario comercial (kWh)</b>
<b>Cazhapugro – La Esperanza</b>	20.223	33.556
<b>Collana – Primero de Enero</b>	22.762	39.149

Collana – Tucto

24.396

48.470

---

**TOTAL**

67.381

121.175

---

**Fuente:** Autoría propia.

La energía que se produce solamente abarca el 55.61% de la energía eléctrica requerida para llevar a cabo las líneas de conducción con estaciones de bombeo, por lo que la energía restante, 53.794 kWh, deberá ser proporcionado por la empresa eléctrica CENTROSUR para abastecer con su totalidad la energía necesaria para llevar a cabo el proyecto de riego.

En el año 2023, la empresa eléctrica CENTROSUR estableció en su pliego tarifario los cargos tarifarios únicos dependiendo la categoría de uso eléctrico (residencial, comercial, industrial, entre otros), y el nivel de voltaje como a su vez si tiene demanda horaria o no. Dentro del pliego tarifario perteneciente al año 2023, se establece la tarifa para bombeo de agua de medio voltaje, la cual se tomará en consideración para ver el gasto monetario que será de pagar a nivel horario.

**Figura 68.** Cargos tarifarios correspondiente a voltajes de nivel medio.

PERIODO: ENERO - DICIEMBRE  
EMPRESAS ELÉCTRICAS:  
AMBATO - AZOGUES - CNEL BOLÍVAR - CENTROSUR - COTOPAXI - NORTE - RIOBAMBA - SUR

CARGOS TARIFARIOS ÚNICOS

RANGO DE CONSUMO	DEMANDA (USD/kW.mes)	ENERGÍA (USD/kWh)	COMERCIALIZACIÓN (USD/Consumidor)
NIVEL VOLTAJE	MEDIO VOLTAJE CON DEMANDA		1,414
	COMERCIALES		
	4,790	0,095	
	INDUSTRIALES		
	4,790	0,083	
	E. OFICIALES, ESC. DEPORTIVOS SERVICIO COMUNITARIO Y ABONADOS ESPECIALES		
	4,790	0,071	
	BOMBEO AGUA		
	4,790	0,061	

**Fuente:** (CENTROSUR, 2023).

Se estima un valor de 0.061 USD por cada kWh consumido, el cual será de uso para el cálculo de estimación de costo de complementación con energía proveniente de CENTROSUR.

**Figura 69.** *Cálculo de costo diario y anual de energía complementada por empresa CENTROSUR.*

$$\begin{aligned}
 \text{USD} &:= 1 \text{ ¢} \\
 \text{Tarifa} &:= 0.061 \frac{\text{USD}}{\text{kW} \cdot \text{hr}} \\
 \text{Consumo} &:= 53.794 \text{ kW} \cdot 24 \text{ hr} = 1291.056 \text{ kW} \cdot \text{hr} \\
 \text{Costo}_{\text{Dia}} &:= \text{Consumo} \cdot \text{Tarifa} = 78.754 \text{ USD} \\
 \text{Costo}_{\text{Anual}} &:= \text{Costo}_{\text{Dia}} \cdot 365.25 = 28765.05 \text{ USD}
 \end{aligned}$$

**Fuente:** Autoría propia.

Por lo tanto, la empresa eléctrica tendría que complementar un consumo diario de 1291.56 kW, dando un costo de 78.754 USD diario, llevando a pagar a nivel anual un valor de 28765.05 USD. Esto significa un gran ahorro debido a que, al momento de realizar el mismo cálculo con toda la potencia requerida del sistema sin considerar el sistema de turbinas, se tendría que realizar un gasto anual de 64795.423 USD, ahorrando más de 36,000 dólares. Este ahorro es significativo debido a que las comunidades y parroquias rurales no se les proporciona grandes valores de presupuesto para gastos requeridos.

## CAPITULO V. CONCLUSIONES

Al analizar la energía eléctrica que se puede producir por medio de las conducciones de agua, considerando las pérdidas de la turbina en su rendimiento, se obtiene una producción total de 67.381 kWh mediante el caudal del sistema. Sin embargo, esta producción solamente representa el 55.61% de la energía requerida para abastecer las estaciones de bombeo, por lo que el resto de energía requerida deberá ser sustentado por las empresas públicas de energía eléctrica. A pesar de que no se produce una gran cantidad de electricidad para alimentar las estaciones de bombeo de diferentes potencias, se logra un ahorro mayor de treinta y seis mil dólares, siendo de alto impacto tomando en cuenta que el proyecto se realiza en el sector rural del cantón Sígsig.

Debido al comportamiento que se generan dentro de las líneas de conducción, se observa la presencia de presiones negativas dentro de los nodos de análisis, indicando la presencia de cavitaciones en las tuberías del sistema. Esto puede llegar a indicar daños al material aplicado para las tuberías como a las turbinas hidráulicas colocadas para la generación de energía. Estas pérdidas de presión también se deben a la colocación de las turbinas, debido a que se pierde una gran parte de la energía que ingresa para ser transformada en electricidad. Las pérdidas presentadas ocasionan la falta de energía del fluido para llevar a cabo los saltos de agua requeridos, llevando a que no alcance las cotas de llegada; siendo no factible la colocación de turbinas para la generación de energía.

A pesar de las pérdidas que reducen la cota de llegada del agua, aún se realiza un análisis de la producción de energía. Debido a que las conducciones de agua solamente producen el 55.61% de la energía requerida, se optaron también por fuentes alternativas renovables para la generación de electricidad del sistema de bombeo. Se analizan como alternativas la producción por energía eólica y energía solar, en donde se obtiene que la mejor alternativa planteada será la energía eólica ya

que, dependiendo del diámetro de las hélices del rotor, se genera una mayor cantidad de energía considerando el rendimiento bajo que poseen las turbinas eólicas. La energía solar se puede optar solamente si se consigue a nivel industrial, en donde tienen la capacidad de generar más energía por hora debido a la cantidad de energía requerida en el sistema, ya que, basándose a los paneles comerciales, se requieren múltiples paneles para llevar a cabo tal generación. Por lo que la energía eólica se considera como la mejor alternativa para la producción de energía eléctrica para servir a las estaciones de bombeo de cada tramo.

## CAPITULO VI. RECOMENDACIONES

Para llevar a cabo el proyecto, se recomienda tomar en cuenta diversos factores, siendo primero la topografía del sector de estudio, ya que se pueden presentar grandes saltos de cotas por donde el agua debe recorrer para llegar a las comunidades rurales del estudio. La determinación del tipo de material aplicado para las líneas de conducción del sistema también se debe considerar al momento de realizar las modelaciones, ya que altera el soporte de las presiones que se generan en el sistema, como a su vez si se presentan cavitaciones en las tuberías.

La generación de energía eléctrica por medios renovables es un campo que más se ha ido desarrollando con el paso de los últimos años y, se deben implementar aprendizajes dentro de las ramas aplicables, ya que motiva más a la implementación de energías sustentables dentro de proyectos y no depender completamente de la energía proporcionada por las empresas públicas encargadas de la generación de energía eléctrica. Las fuentes renovables son aprovechables dentro de cualquier entorno, y con la implementación de aprendizajes enfocados al aprovechamiento de estas fuentes, se logrará más su impacto en las comunidades.

Para la selección de turbinas, se recomienda analizar según la longitud del salto en la cual se va a realizar la generación de energía, como a su vez el caudal que ingresará por las hélices de la turbina. Dentro de la clasificación de turbinas, también existen sus composiciones que alteran la generación de energía y el rendimiento a la cual se está trabajando el sistema, por lo que se deberá realizar un análisis de acuerdo a los complementos de las turbinas para llevar a cabo la generación requerida. Se deberá considerar el diseño de la turbina de acuerdo a los datos hidráulicos existentes, ya que, si se coloca una turbina sobredimensionada, no se aprovechará la energía potencial que produce el agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- Archivo meteorológico Sigsig.* (s/f). meteoblue. Recuperado el 9 de julio de 2024, de [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/sigsig\\_ecuador\\_3651066](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/sigsig_ecuador_3651066)
- Boyd, C. E. (2019). *Water Quality: An Introduction*. Springer Nature.
- C., F., F., L., Espinoza, J., & R., M. (2015). *Energía solar en el Ecuador* (pp. 330–383).
- Castillo Molina, A., & Vintimilla Bueno, D. C. (2019). *Diseño del sistema de alcantarillado y evaluación de la capacidad hidráulica de la planta de tratamiento de aguas residuales para la comunidad de Sérrag, perteneciente a la Parroquia de Ludo del Cantón Sigsig, Provincia del Azuay* [bachelorThesis, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9479>
- Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., Morales Rojas, A. D., Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., & Morales Rojas, A. D. (2023). Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación. *Ingeniería y competitividad*, 25(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11797>
- CENACE. (2023). *Informe Anual—Operador Nacional de Electricidad* (1; p. 103). Ministerio de Energía y Minas.
- CENTROSUR. (2023). Categorías tarifarias. *Centrosur*. <https://www.centrosur.gob.ec/categorias-tarifarias/>
- Combarro Marina, M. (2022). *Diseño de una turbina Kaplan y posterior simulación mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional*. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/25346>

- Cordero Ferrero, J. (2019). Economía circular: El ciclo integral del Agua y la eficiencia energética. *Encuentros multidisciplinares*, 21(63), 13.
- Departamento de Planificación. (2021, agosto). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia del Azuay 2019—2030*. Gobierno Provincial del Azuay.
- Dirección de Riego, Drenaje y Aguas Subterráneas. (2019, marzo). *Mejoramiento del Sistema de Riego “Río Minas—Ludo.” Ludo—Sígsig—Azuay*. GAD Azuay.
- Erbia Energy. (2020, febrero 13). ¿Utilizar la biomasa para producir energía con un sistema ecológico? *Erbia Energy Solutions*. <https://erbiaenergy.com/es-posible-utilizar-la-biomasa-para-producir-energia-con-un-sistema-ecologico/>
- Espejo Marín, C. (2004). *La energía eólica en España*. <https://doi.org/10.14198/INGEO2004.35.03>
- Fernández, J. (2004). *Energías renovables para todos. Biomasa*. Energías Renovables.
- Fernández Ordóñez, K. S. (2024). *Rediseño de red de conducción y distribución de agua potable para la comunidad de Molobog Grande comuna Buena Esperanza* [bachelorThesis]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26983>
- G. Allen, R., S. Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147846>
- GAD Parroquial Ludo. (2020). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquial Ludo*.
- Gavilánez, A., Caiza, G., Tapia, M., & Mora, J. (2020). Energías Renovables y Diseño Industrial: Influencia en Sudamérica. *REvista INGENIO*, 3(2), 55–67.
- GEOLIDERAR. (2018, junio 12). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Sígsig 2015*. GAD Sígsig.

- <https://www.sigsig.gob.ec/download/actualizacion-del-plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial-del-canton-sigsig-2015/>
- Gobierno Provincial del Azuay. (2019). *Geoportal Descargas*.  
<https://www.azuay.gob.ec/index.php/geoportal-descargas/>
- González Sánchez, M. (2021). *Características del viento y estudio del potencial de energía eólica en Estados Unidos* [Universidad de Valladolid].  
<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/50708>
- G.U.N.T. Gerätebau. (2024). *Turbinas eólicas*. Gunt Hamburg.  
[https://www.gunt.de/es/productos/glct-1:pa-150?option=com\\_gunt&view=panel&task=gunt.suche.suche.request&Itemid=150&back=1](https://www.gunt.de/es/productos/glct-1:pa-150?option=com_gunt&view=panel&task=gunt.suche.suche.request&Itemid=150&back=1)
- Hess, D., & Tasa, D. (2016). *McKnight's Physical Geography: A Landscape Appreciation* (12a ed.). Pearson Education.
- IRENA. (2017). *Renewable Capacity Statistics 2017* (p. 60). International Renewable Energy Agency.
- Martín, N. Q., & Infante, J. M. F. (2021). Factibilidad de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH). *Eco Solar*, 75, Article 75.
- Mateos Rodríguez, B., & Leco Berrocal, F. (2011). *La producción de energía hidroeléctrica en Extremadura*. Asociación de Geógrafos Españoles (AGE).  
<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/47297>
- Mereke, N. B., Ancha, V. R., & Hendrick, P. (2024). Numerical modeling and CFD simulation of diffuser augmented dual vertical axis hydrokinetic Banki-Michell turbine. *Heliyon*, 10(5), e26970. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26970>

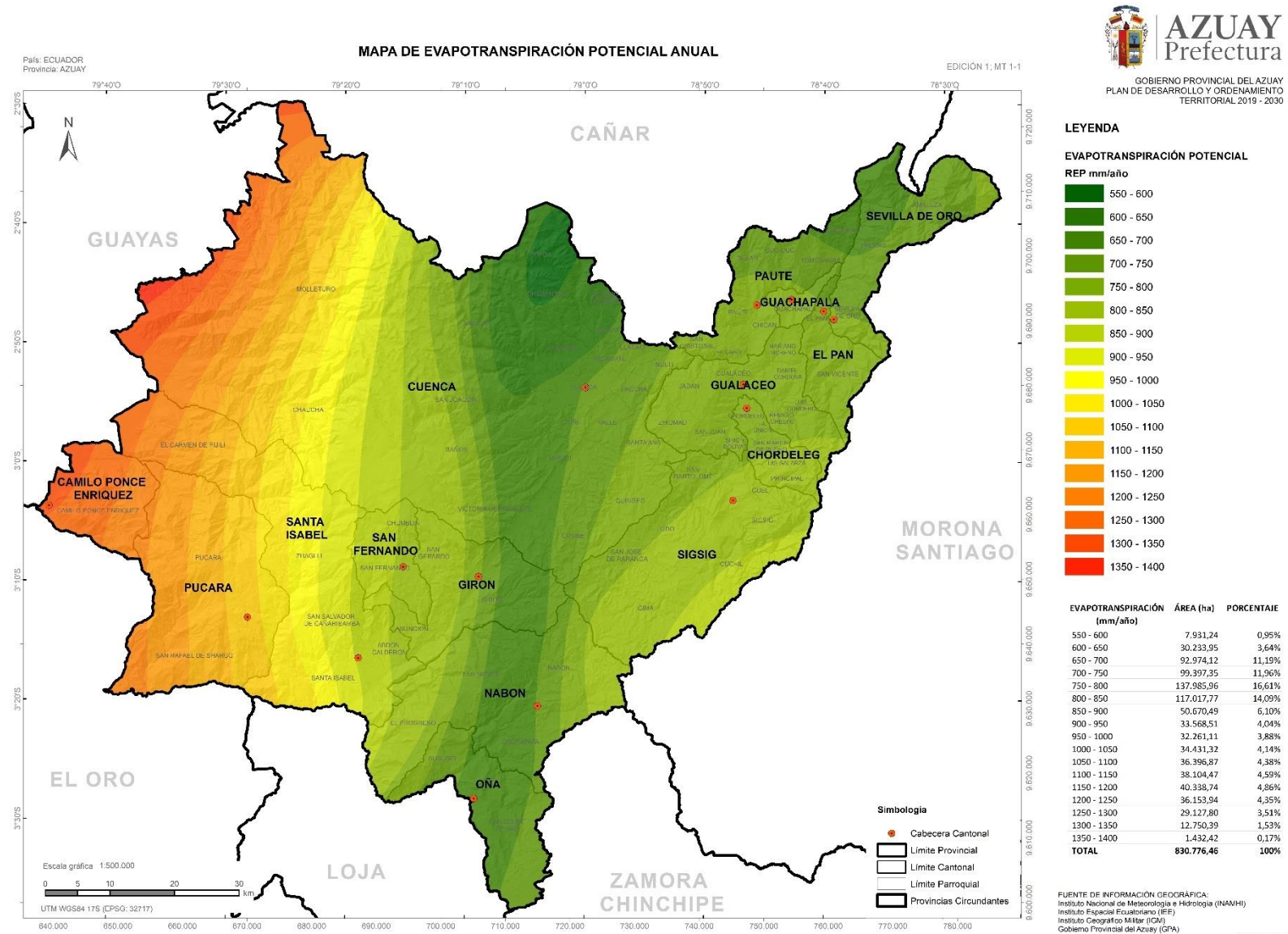
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2013). *Data Access Viewer Enhanced*. NASA POWER. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Paraguay Cconovilca, J. (2021). Selección óptima de la turbina hidráulica para el aprovechamiento del recurso hidroenergético de la mini central hidroeléctrica de la CC.NN. Betania. *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6482>
- Profiroiu, C. M., Bodislav, D. A., Burlacu, S., & Rădulescu, C. V. (2020). Challenges of Sustainable Urban Development in the Context of Population Growth. *European Journal of Sustainable Development*, 9(3), Article 3. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n3p51>
- Quito Bernal, M. C., & Cárdenas Cordero, N. M. (2022). Aplicación de metodologías activas en instituciones rurales del cantón Sígsig parroquia Ludo. *Dominio de las Ciencias*, 8(Extra 2), 808–820.
- Rojas Muñoz, A. (2017). *Interfaz gráfica para el análisis del funcionamiento de paneles solares fotovoltaicos de concentración* (east=-3.7264138000000457; north=40.451944999999999; name=Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Comunidad de Madrid, España) [Info:eu-repo/semantics/bachelorThesis]. E.T.S.I. Diseño Industrial (UPM). <https://oa.upm.es/36382/>
- Romero-Hernandez, O., Romero-Hernández, S., & Duncan, W. (2011). *Energías Renovables: Impulso político y tecnológico para un México sustentable*.
- Santana, M. (2018). *RI UFPE: Análise dos transientes hidráulicos em uma adutora localizada no município de Vicência-PE utilizando o software ALLIEVI* [Universidad Federal de Pernambuco]. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/47144>

Serna-Perales, A. (2023). *DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA TURBINA FRANCIS PARA USO DOCENTE*. <http://crea.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/20502>

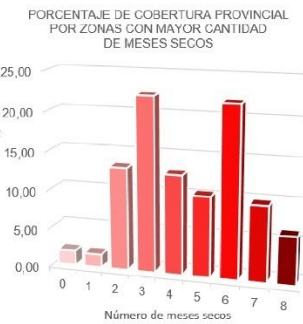
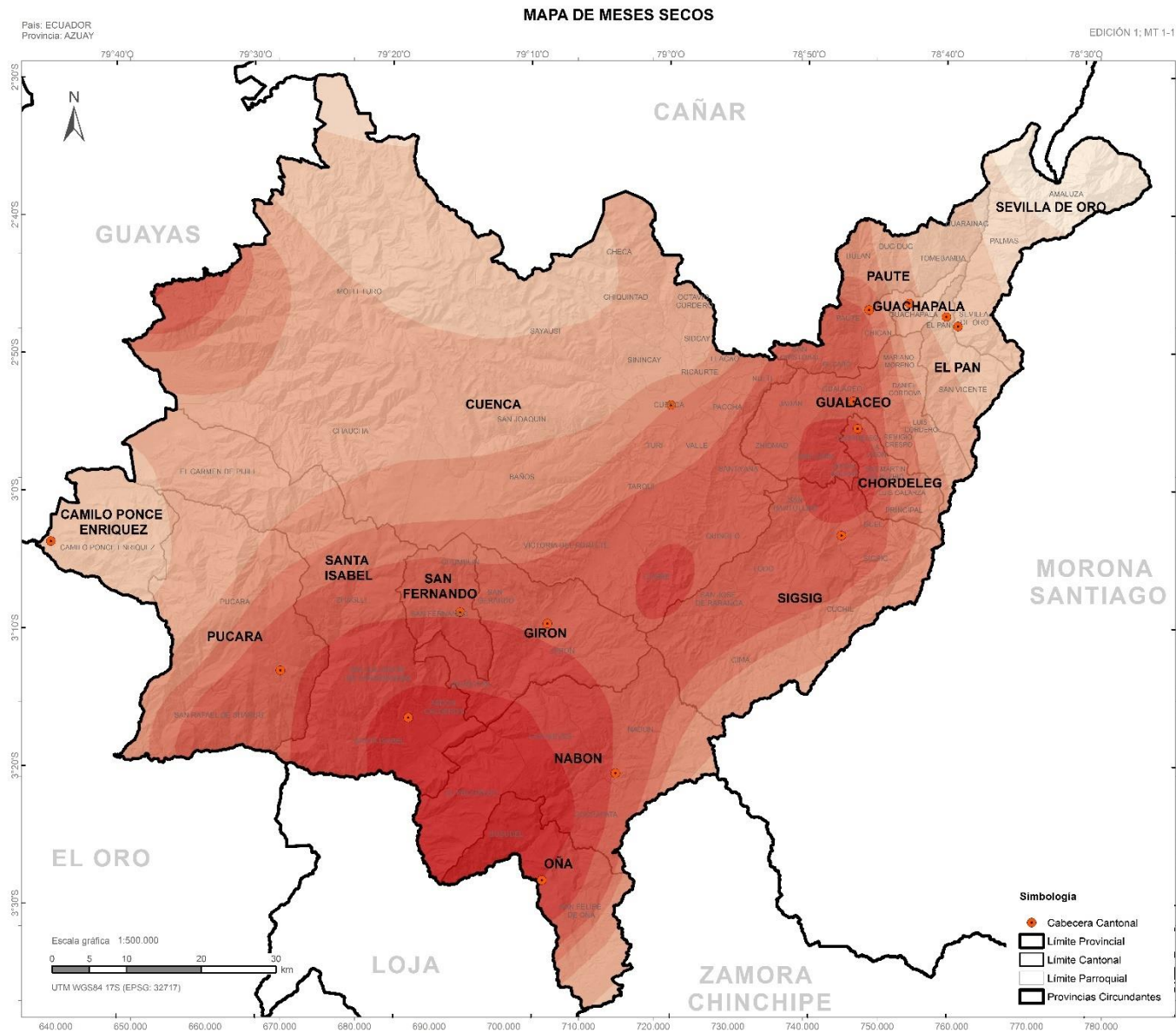
UPME et. al. (2015). *Atlas del Potencial Hidroeléctrico de Colombia* (1ra ed.). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potenc...>

# ANEXOS

## Anexo 1. Mapa de evapotranspiración potencial anual de la provincia del Azuay.



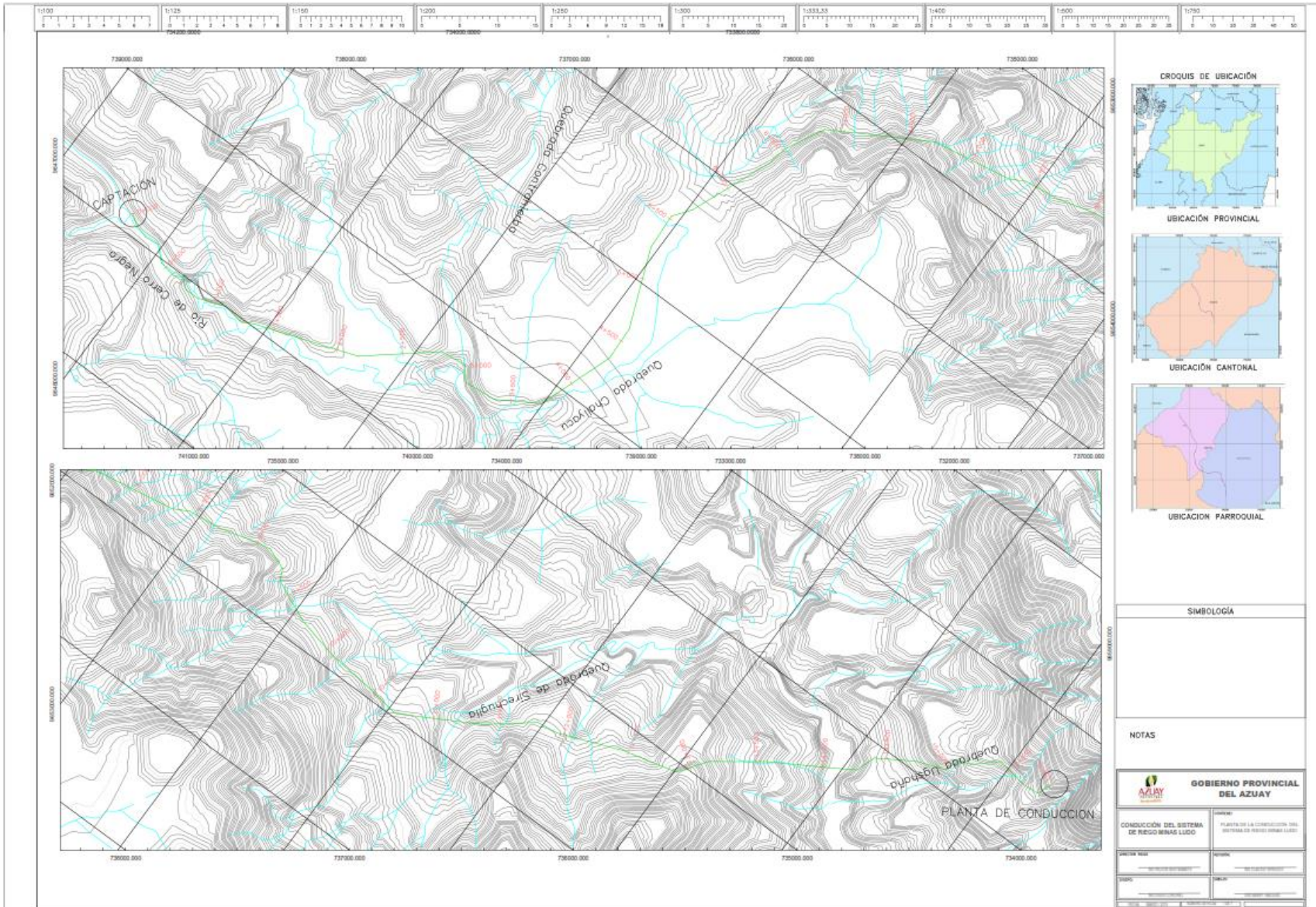
## Anexo 2. Mapa de meses secos de la provincia del Azuay.



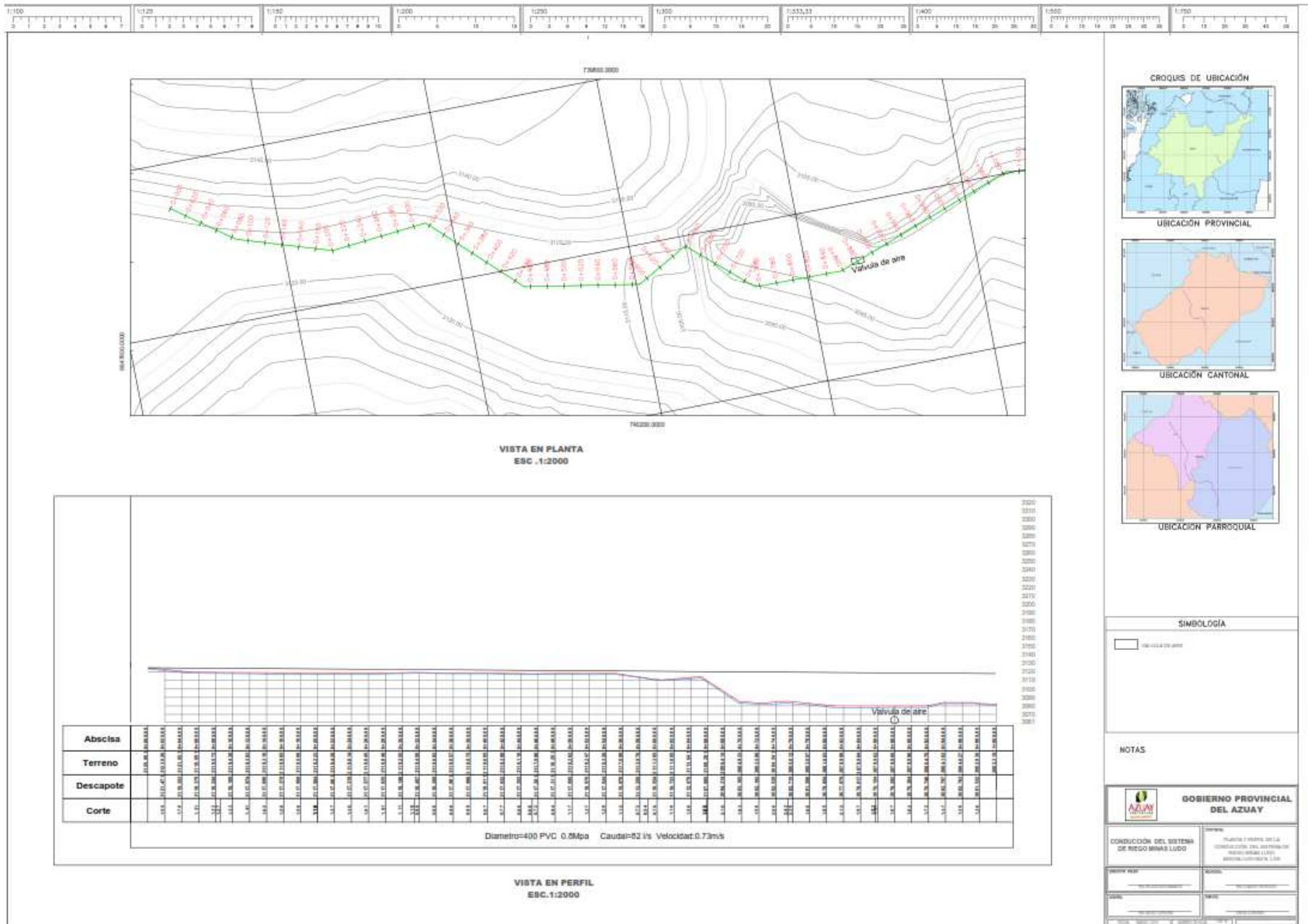
FUENTE DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA:  
Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)  
Instituto Geográfico Militar (IGM)  
Gobierno Provincial del Azuay (GPA)

mapa\_modelo\_A3

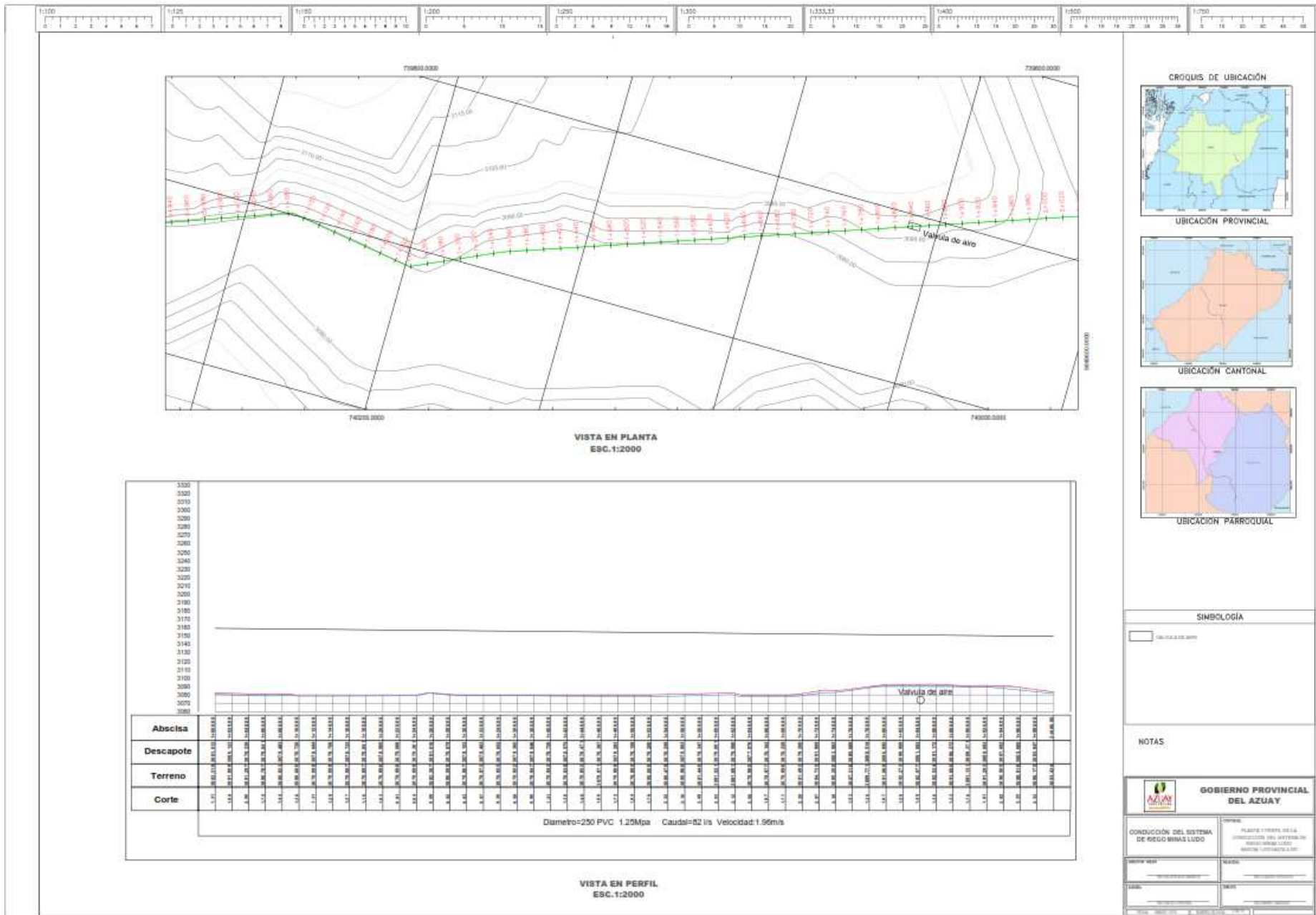
### Anexo 3. Conducción del Sistema de Riego Minas Ludo.



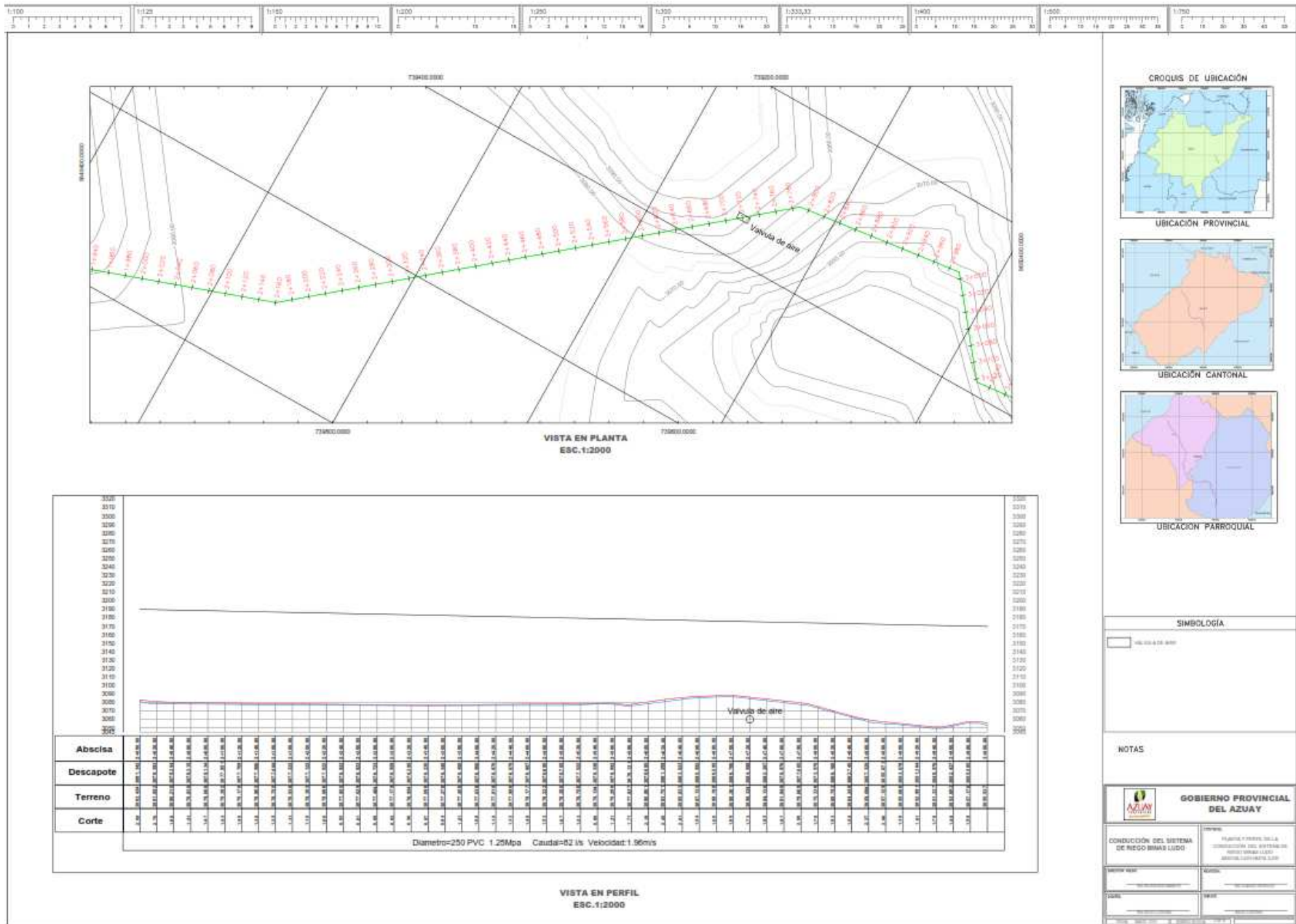
# Anexo 4. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 0+000 a 1+000



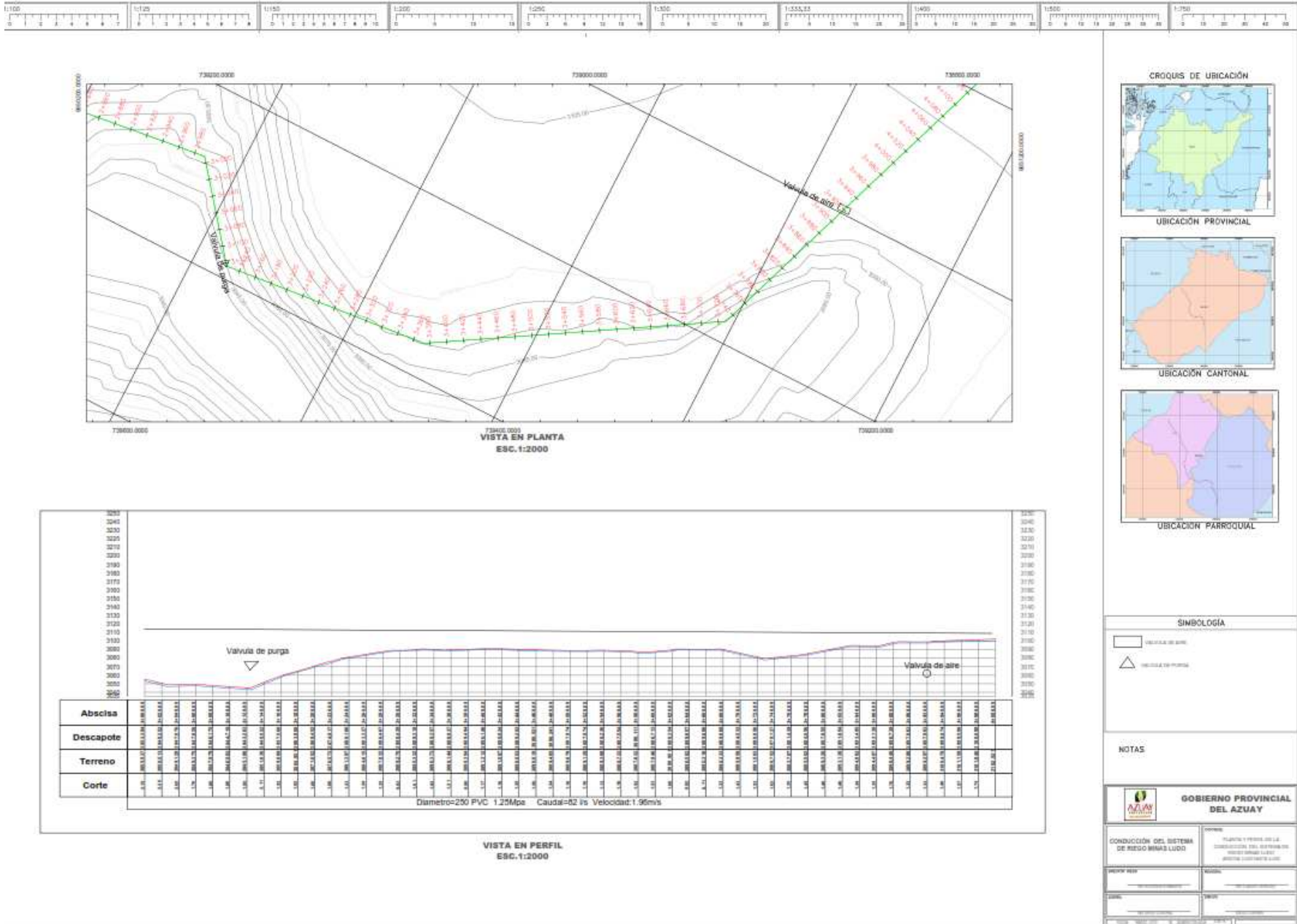
# Anexo 5. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 1+000 a 2+000



# Anexo 6. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 2+000 a 3+000



# Anexo 7. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 3+000 a 4+000



**NOTAS**

**GOBIERNO PROVINCIAL DEL AZUAY**

CONDUCCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO MINAS LUDO

PROYECTO: PLANTA Y PERFIL DEL SISTEMA DE RIEGO MINAS LUDO

PROYECTISTA: [ ]

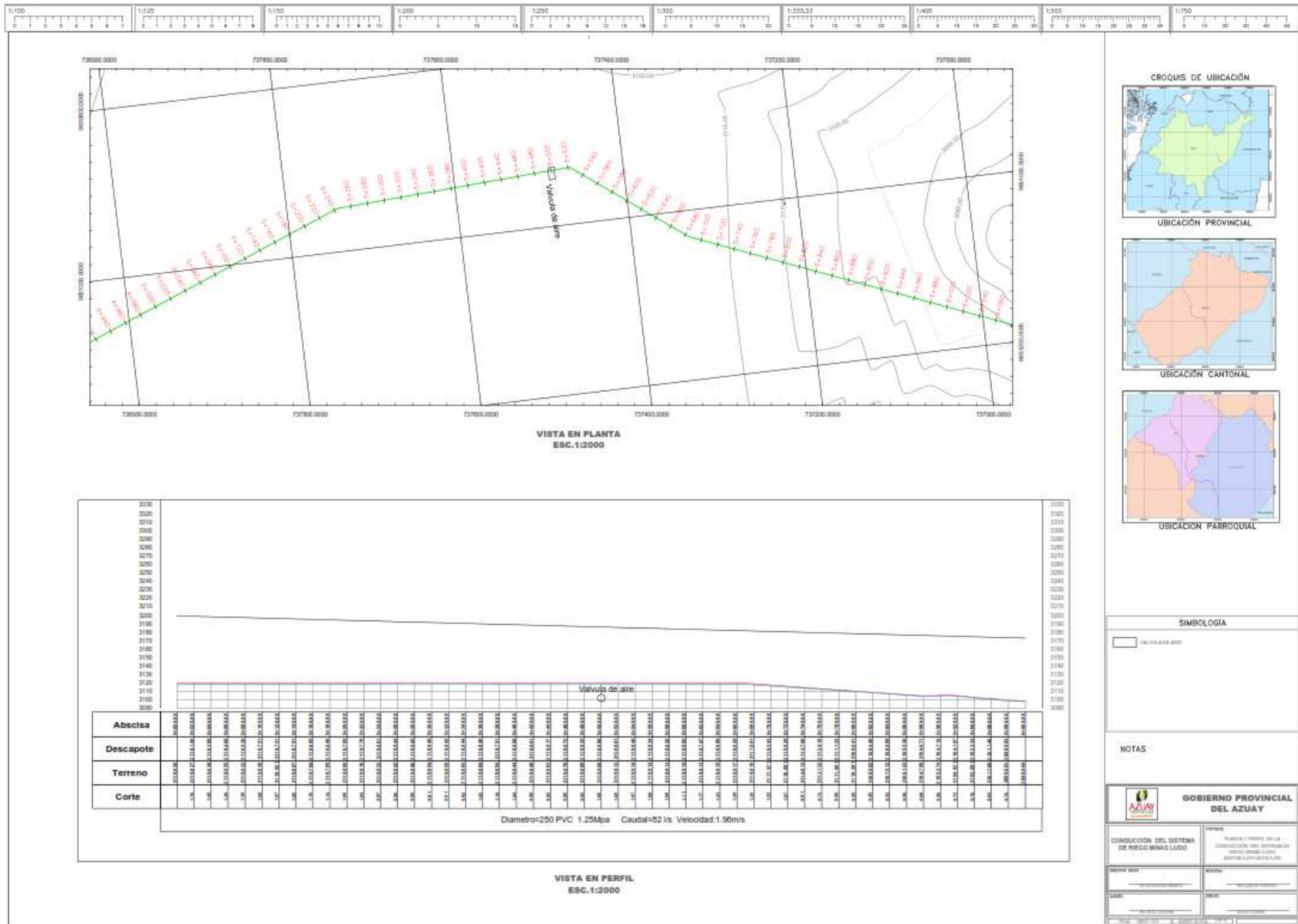
CLIENTE: [ ]

FECHA: [ ]

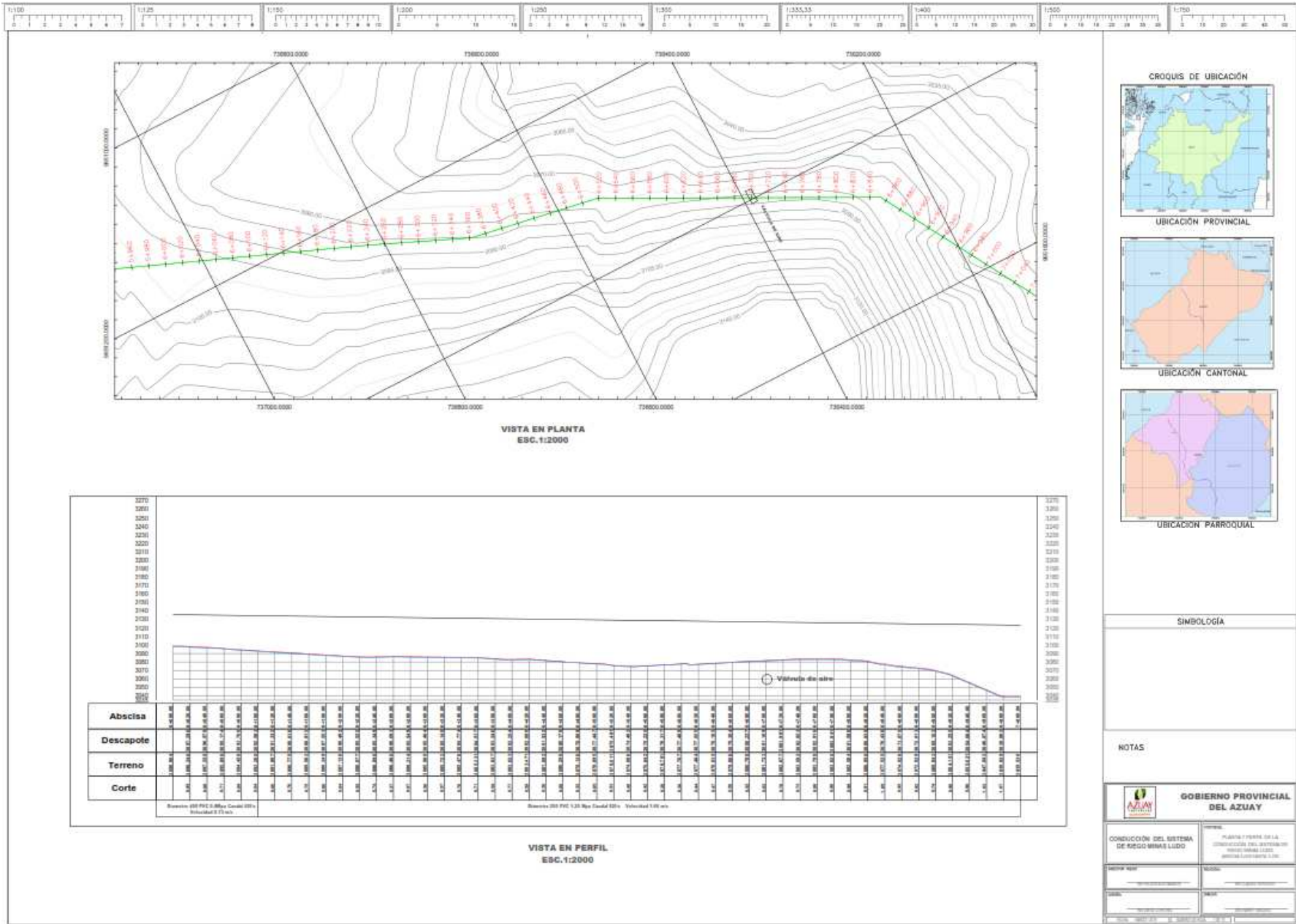
ESCALA: [ ]



# Anexo 9. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 5+000 a 6+000



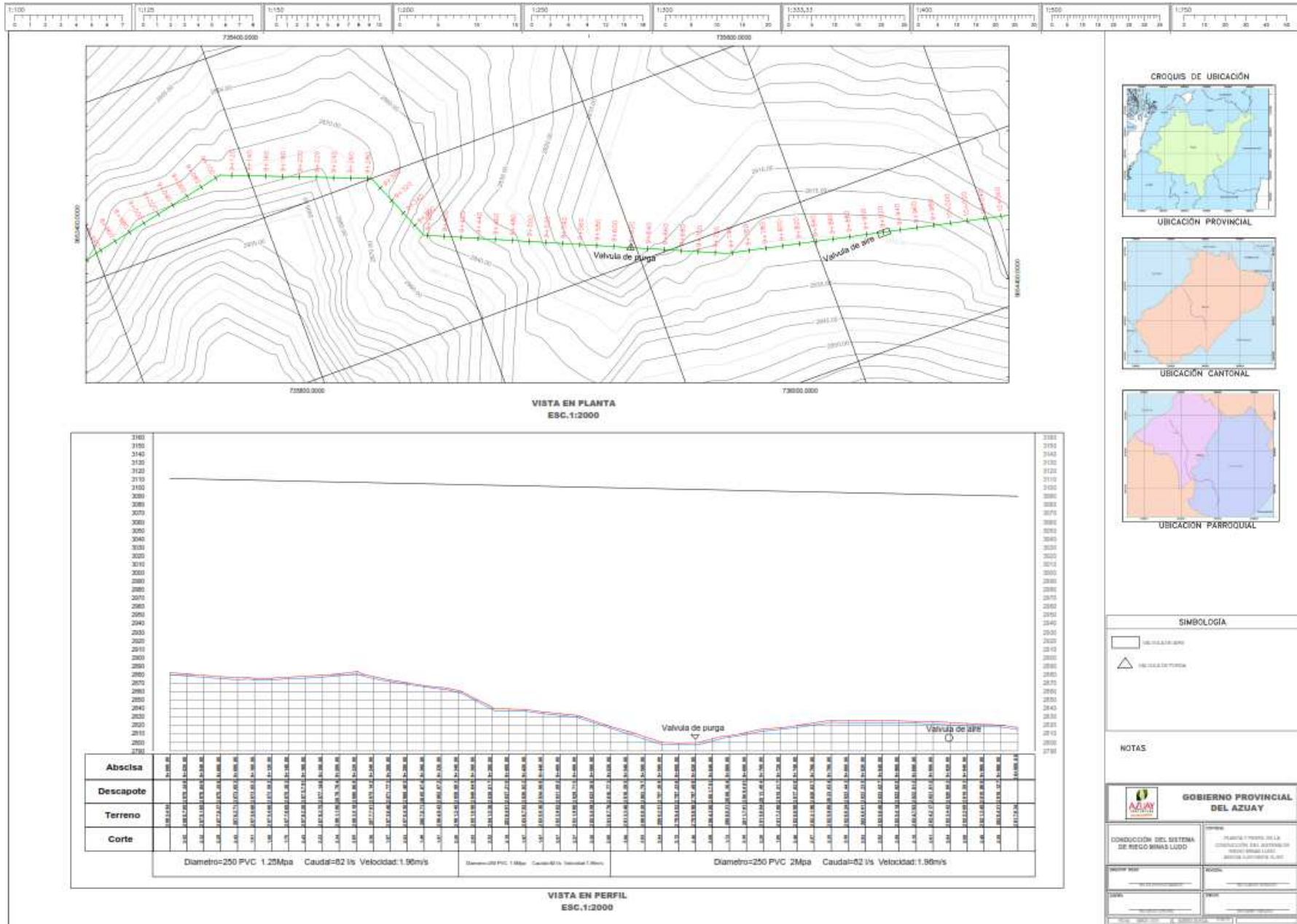
# Anexo 10. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 6+000 a 7+000



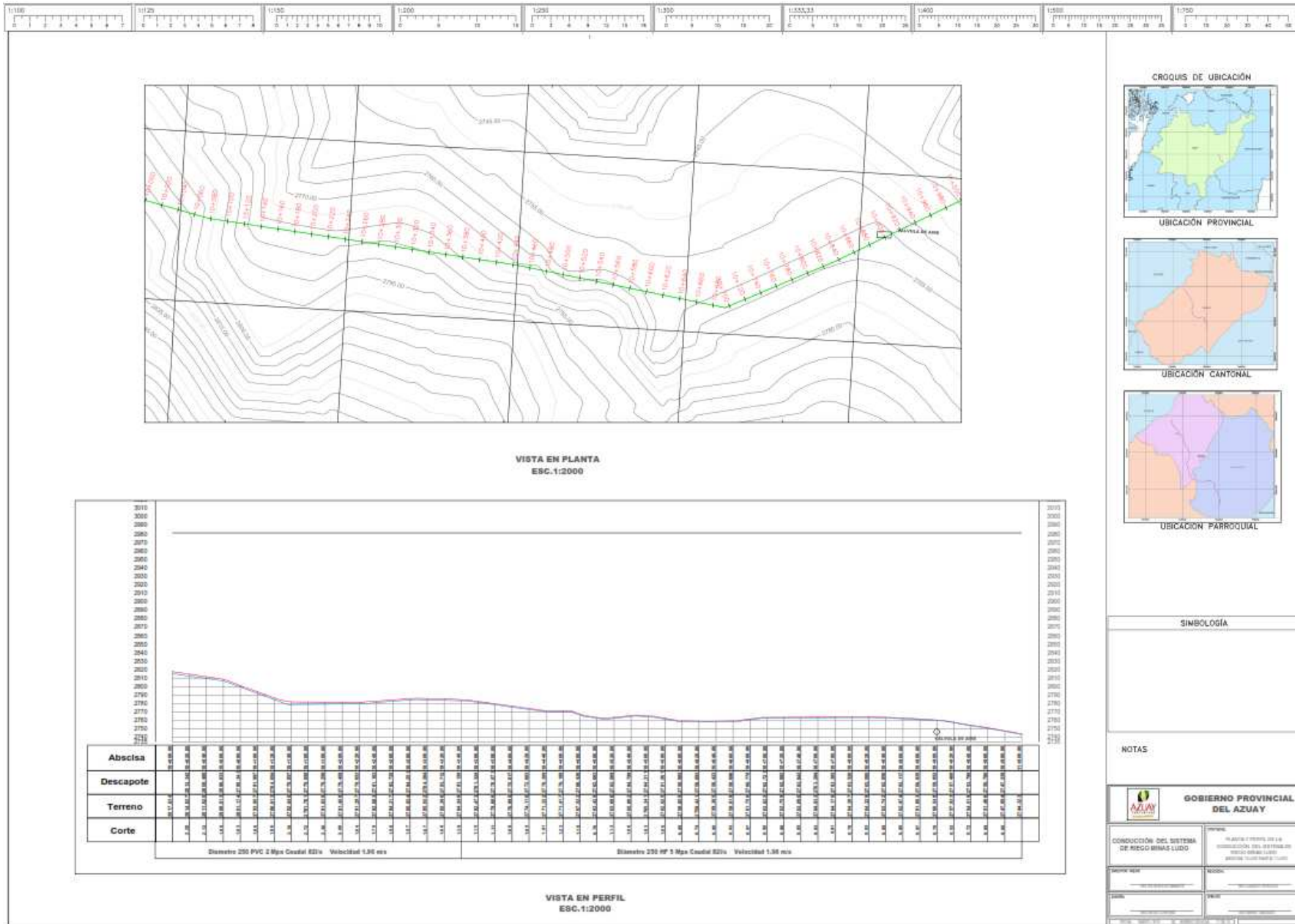




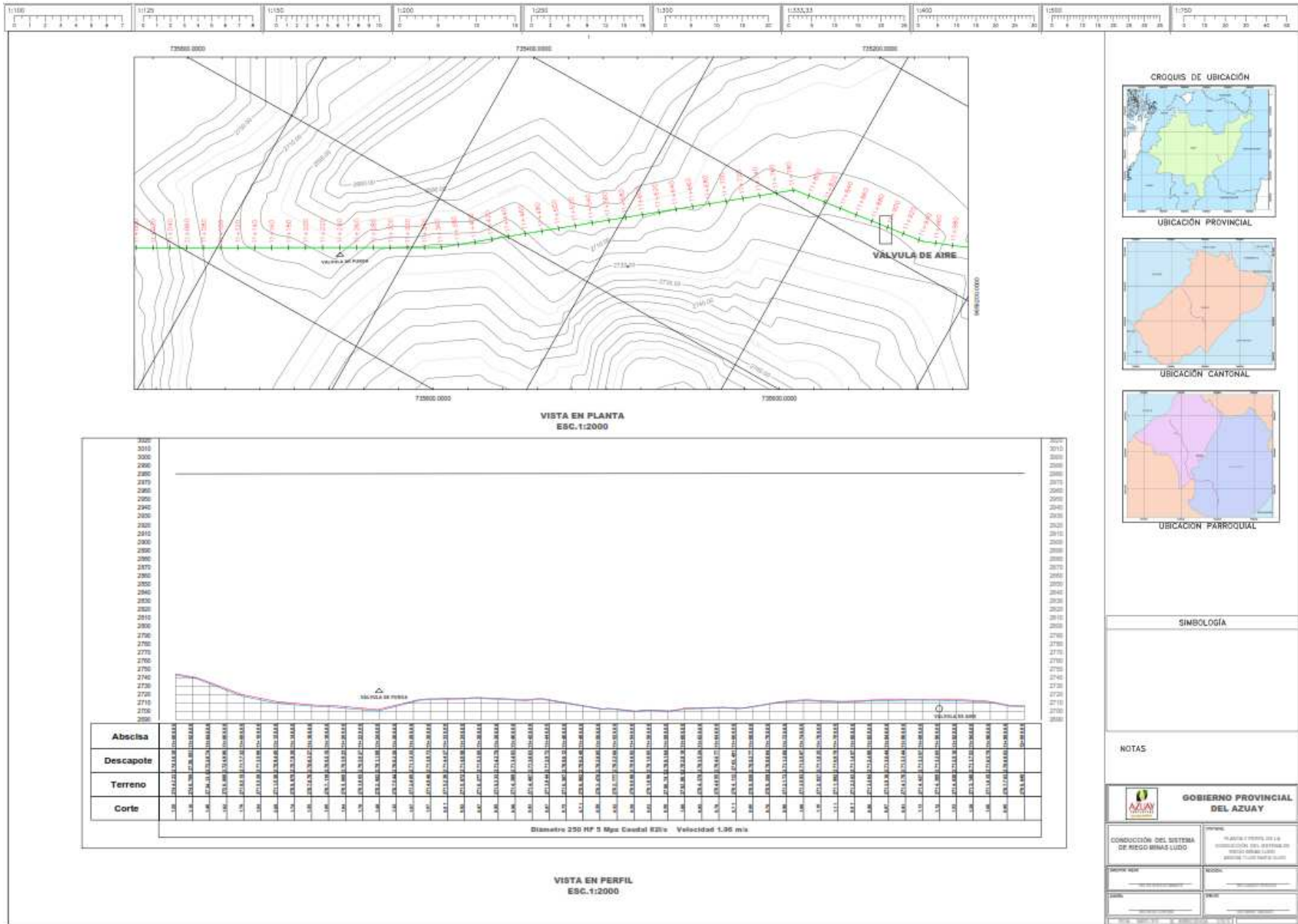
# Anexo 13. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 9+000 a 10+000



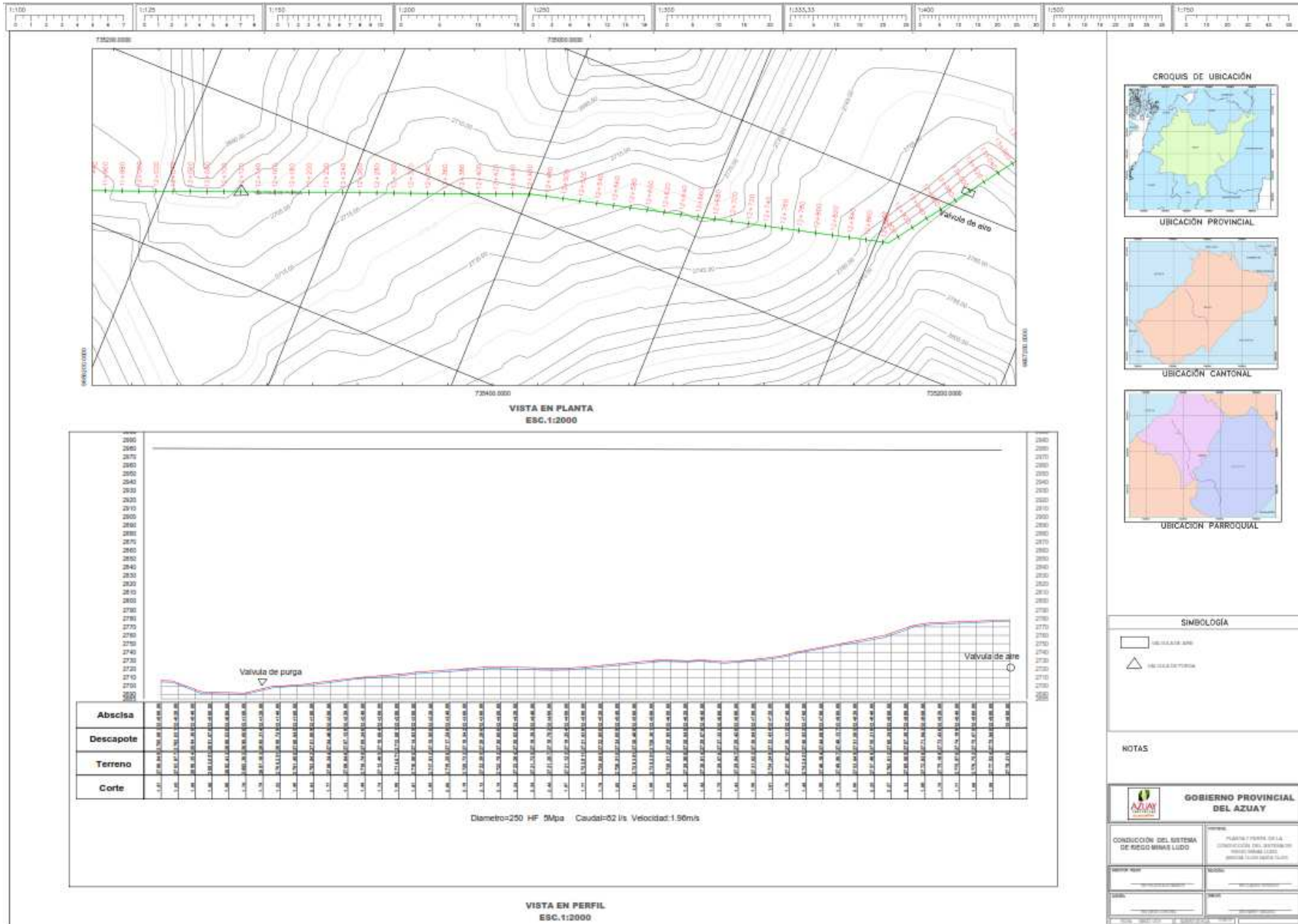
# Anexo 14. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 10+000 a 11+000



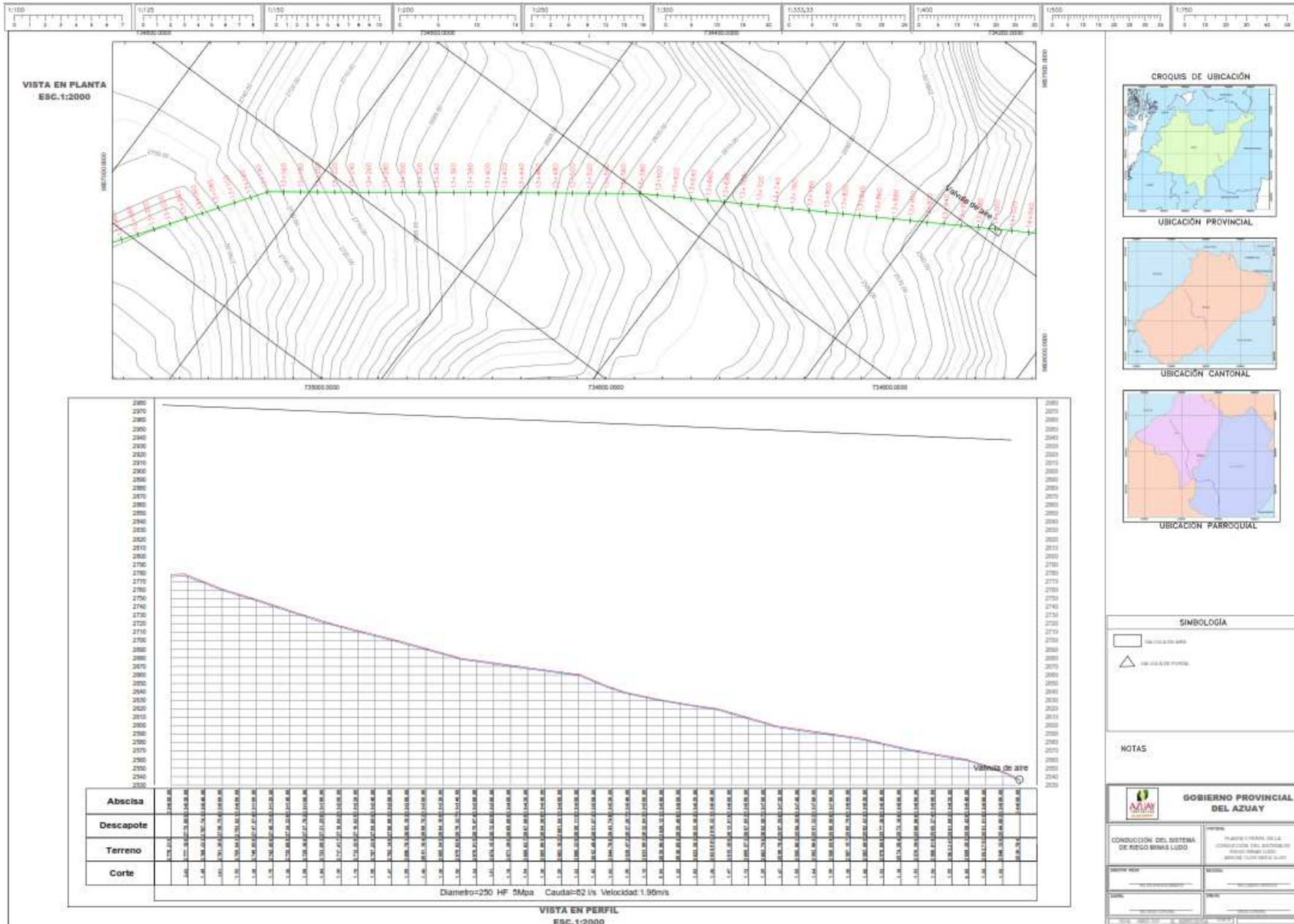
# Anexo 15. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 11+000 a 12+000



# Anexo 16. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 12+000 a 13+000

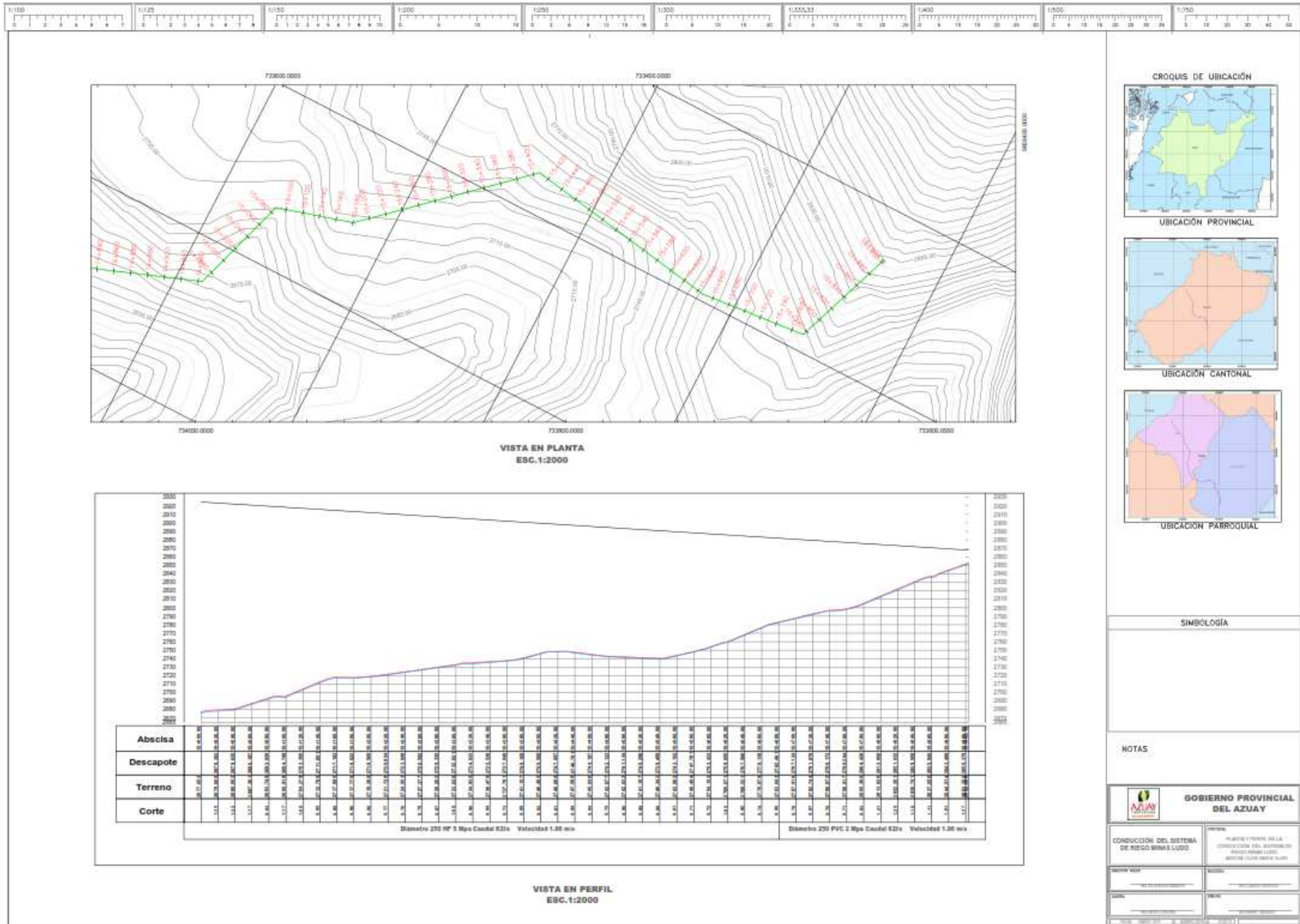


# Anexo 17. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 13+000 a 14+000





# Anexo 19. Planta y perfil de conducción del sistema de riego Minas Ludo. Abscisa 15+000 a 15+903



**SIMBOLOGÍA**

**NOTAS**

**GOBIERNO PROVINCIAL DEL AZUAY**

**CONDUCCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO MINAS LUDO**

PROYECTO DE INGENIERÍA DE OBRAS DE CONDUCCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO MINAS LUDO. PARROQUIA AZUAY. AZUAY. AZUAY. AZUAY.

FECHA: \_\_\_\_\_

ELABORADO POR: \_\_\_\_\_

REVISADO POR: \_\_\_\_\_

APROBADO POR: \_\_\_\_\_

## AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Pablo Cesar Cardona Vivar**, portador de la cédula de ciudadanía N.º **0706911153**. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “**Análisis de generación hidroeléctrica para estaciones de bombeo, con energía de conducciones de agua. Caso de estudio Proyecto de Riego Minas**” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 4 de septiembre de 2024

F:   
Pablo Cesar Cardona Vivar  
0706911153