

# PROYECTO HIDROELÉCTRICO SANTIAGO

## ACTUALIZACIÓN DE LOS ESTUDIOS Y DISEÑOS DEFINITIVOS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SANTIAGO PARA SU CONSTRUCCIÓN POR ETAPAS

### ETAPA 1 Y ETAPA 2



### INFORME EJECUTIVO DE DISEÑOS DEFINITIVOS

Reemplaza a: **LX-SAN-44-14-JPY-IE-002**

2018.0717.003-I-GG-CO-002

A	09.08.2021	ChS/FaB/Bat/SUL/DAC/SLZ/Tap/BF/JPT	Bra/Mif/Bes
<b>Versión</b>	<b>Fecha</b>	<b>Redactado</b>	<b>Verificado</b>

**Lombardi SA** Ingenieros Consultores, Sucursal Ecuador  
 Av. República del Salvador N35-82 y Portugal  
 Edif. Twin Towers, séptimo piso, Of. 7D – D.M. Quito  
 Teléfonos +593 2 244 79 09 / +593 2 243 18 29  
 quito@lombardi.group, www.lombardi.group

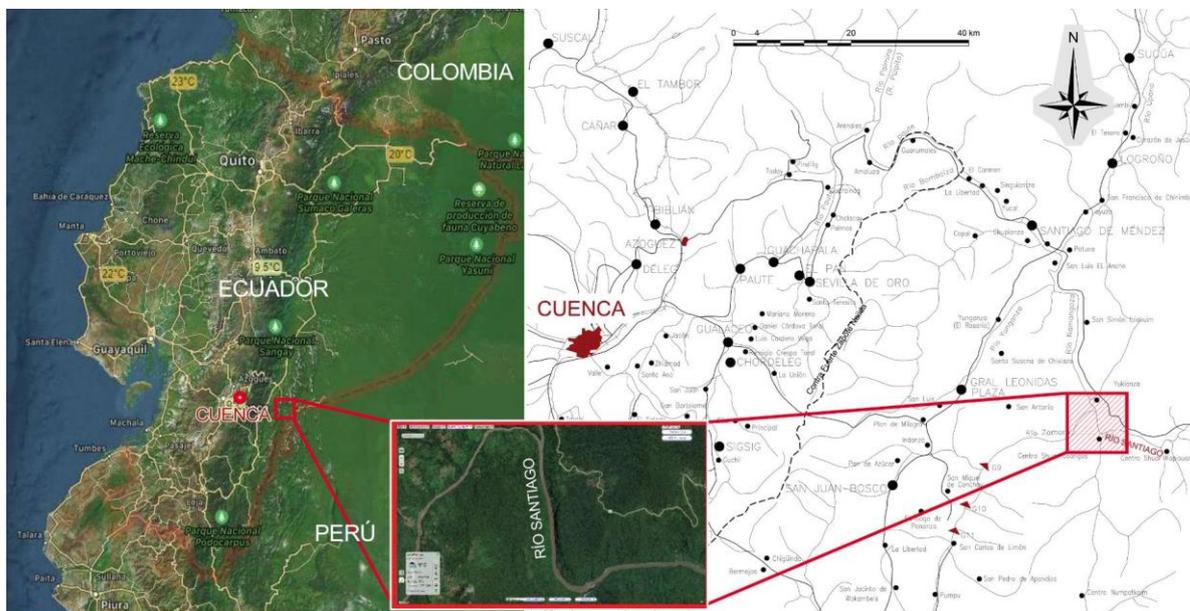
## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Glosario de términos	3
1.2	Estructura del informe	7
2.	METODOLOGÍA	8
2.1	Marco general para el desarrollo del proyecto definitivo Santiago	8
2.2	Desarrollo del proyecto Santiago para su construcción por etapas	8
3.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	9
3.1	Obra de desvío	9
3.2	Obra de contención	10
3.3	Obra de excedencias	11
3.4	Obra de desagüe de fondo	12
3.5	Obras de generación	12
3.6	Sistema de auscultación	14
3.7	Obras complementarias	15
4.	TOPOGRAFÍA	17
5.	GEOLOGÍA	18
5.1	Litología	18
5.2	Condiciones geológicas en las zonas de la presa	19
6.	GEOTECNIA	21
6.1	Trabajos de campo y laboratorio	21
6.2	Clasificación geomecánica de los materiales	21
7.	HIDROLOGÍA	23
7.1	Localización del proyecto en el contexto hidrológico	23
7.2	Caudales	25
8.	SEDIMENTOS	27
8.1	Resultados de la modelación	27

8.2	Conclusiones del Estudio de Sedimentos	29
9.	ESTUDIO HIDROENERGÉTICO	30
9.1	Análisis plan maestro de electrificación 2018 - 2027	30
9.2	Expansión de la transmisión	32
9.3	Estimación de la producción	32
10.	PRESUPUESTO Y PROGRAMACIÓN DE OBRA	34
10.1	Presupuesto etapa 1	34
10.2	Programa de obra etapa 1	34
10.3	Presupuesto etapa 2	37
10.4	Programa de Obra etapa 2	37
11.	EVALUACIÓN ECONÓMICA-FINANCIERA	39
11.1	Evaluación económica-financiera etapa 1	39
11.2	Resultados principales del análisis económico	40
11.3	Resultados principales análisis financiero	41
11.4	Evaluación económico-financiera etapa 2	41
11.5	Resultados principales Etapa 1 y Etapa 2 conjuntamente	42
11.6	Escenarios alternativos para la viabilidad de la Etapa 2.	43
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
12.1	Principales optimizaciones y rediseños	45
12.2	Parámetros financieros y económicos	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
12.3	Recomendaciones	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
13.	REFERENCIAS	48
13.1	Estudios	48
13.2	Artículos y libros	48

## 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto hidroeléctrico Santiago se ubica en el tramo inicial del río del mismo nombre, luego de la unión de los ríos Zamora y Namangoza. Las cuencas de estos tres ríos se encuentran al sur-este del Ecuador.



**Figura 1 :** ubicación del Proyecto Hidroeléctrico Santiago

El proyecto hidroeléctrico Santiago se compone de una presa de arco-gravedad de HCR, obra de excedencia y desagüe de fondo en el mismo cuerpo de la presa, obra de desvío, obra de generación y obras viales. Del análisis de los costos-energía generada óptima y requisitos del Plan Maestro de Electricidad 2018-2027, se concluyó que lo mejor es diseñar una primera etapa con 8 grupos y potencia total aproximada de 2 400 MW, y una segunda etapa de construcción con 4 grupos más, llevando la potencia total a los aproximadamente 3 600 MW (Ref. [5]), para lo cual Lombardi modificó la documentación del proyecto realizado en 2 016 por la CFE, habiendo hechos documentos nuevos, documentos modificados, y otros documentos que no tuvieron cambios.

El presente informe resume las características principales del proyecto hidroeléctrico Santiago diseñado para su construcción en etapas, describiendo a grandes rasgos y en términos generales, la zona de implantación, su topografía, geología y geotecnia, hidrología, así como las componentes del proyecto, plazo y plan de construcción, generación de energía eléctrica y sus variables financieras.

A los fines de mantener un uso inequívoco en los términos del presente convenio, se adjunta el siguiente glosario de términos:

### 1.1 Glosario de términos

**Etapa 1:** Construcción del proyecto Santiago que contempla la construcción de la totalidad de las obras de desvío, contención y excedencias (vertederos). Las obras de generación con 8 unidades,

cada una con una potencia nominal en salida de transformadores de 302,5 MW, que comprenden: obra de toma completa para 8 tomas (para las 4 restantes tomas solo el hormigón inundado con sus compuertas); 8 túneles de aducción o de presión; casa de máquinas; caverna de transformación; 8 túneles de aspiración; caverna de oscilación; 2 túneles de desfogue, canal de desfogue; subestación completa para 12 unidades y 6 líneas de transmisión.

*Etapa 2:* Construcción de las obras de generación con 4 unidades de generación con una potencia nominal en salida de transformadores de 302,5 MW, que comprenden: completamiento de la obra de toma; 4 túneles de aducción o de presión; casa de máquinas; caverna de transformación; 4 túneles de aspiración; caverna de oscilación; 1 túnel de desfogue, completamiento del portal de salida en canal de desfogue;

*Completamiento de la obra de toma:* construcción de la obra civil y montaje electromecánico sobre el nivel 455 msnm (sobre inundado). Esto permite construir la Etapa 2 sin bajar el nivel del embalse y evitar parar la generación de energía de la central.

*Completamiento del canal de desfogue:* Montaje electromecánico y completamiento de obra civil menor.

*Optimización:* es la mejora de una parte del diseño definitivo 2016 de las obras de generación.

*Documentos:* son los siguientes, pero no limitados a, planos, memorias técnicas o de cálculo, especificaciones técnicas e informes.

*Revisión:* someter los documentos a uno o varios exámenes para corregirlos, de ser el caso.

*Corrección:* es la actividad de detectar y enmendar los errores de los documentos.

*Aprobación:* calificar por bueno y suficiente un documento.

*Validación:* calificar por aprobado, sin haber realizado correcciones.

*Planos:* representación esquemática en dos dimensiones y a determinada escala, de un terreno, una máquina, una construcción, una obra, un diagrama, entre otros.

*Informes:* descripción escrita de las características de diseño y/o de los procesos de construcción.

*Memorias, memorias técnicas o memorias de cálculo:* son los procedimientos escritos de forma detallada de cómo se realizaron los cálculos de las ingenierías que intervienen en el desarrollo del proyecto.

*Especificaciones técnicas:* son los documentos en los cuales se definen las normas, exigencias y procedimientos a ser empleados y aplicados en todos los trabajos de construcción, elaboración de estudios, ensayos, fabricación de equipos, medición y forma de pago, entre otros.

*Estrategia de emisión de documentos:*

*Cuadro de rotulación o carátula o rótulo:* área del documento donde se indica o da a conocer la descripción, el objeto, fecha, nombre de proyecto, código y nombre del documento, escala, personas quienes lo realizan, revisan y aprueban.

*Código de los documentos:* combinación de letras y números que tiene como objetivo asignar biunívocamente el nombre del documento dentro de un sistema establecido. Para el proyecto Santiago, la codificación de Lombardi contará con la siguiente estructura:

- Proyecto de Lombardi y Fase - Tipo de Documento – Área – Especialidad - Número de tres cifras, ver **Tabla 1**.

Proyecto y Fase	Tipo de documento	Área	Especialidad	Número
2018.0717.003	P (Plano) I (informe) M (Memoria) E (Especificación)	OD (Obra de desvío) OC (Obra de contención) OE (Obra de excedencia) OG (Obra de generación) DF (Desagüe de fondo) GG (Generales)	HI (Hidráulica) GE (Geotécnia) GL (Geología) EL (Electricidad&control) ME (Mecánica) EM (Electromecánica) CI (Civil) ES (Estructuras) AR (Arquitectura) CO (Coordinación)	ZZZ

**Tabla 1:** Codificación de documentos Lombardi para proyecto Santiago.

*Dentro del rótulo de un documento quedará indicado:*

*Dibujado o Redactado:* profesional responsable del dibujo o redacción del documento

*Revisado o Verificado:* profesional o profesionales responsables que revisaron o verificaron el documento

*Aprobado:* profesional responsable que aprobó el documento

*Versión del documento (Ver.):* cada una de las emisiones presentadas a CELEC, en forma consecutiva

*Logotipo:* símbolo gráfico peculiar que representa una institución o empresa.

*Referencia a documento predecesor de CFE:* en caso de existir, se referenciará al código de documento de CFE que fuera modificado u homogenizado por Lombardi.

*Croquis de localización:* dibujo general a escala grande, donde se identifica la ubicación del área de la obra que se representa en el documento.

*Simbología:* representación gráfica de un concepto de carácter técnico, constituida por una o más letras u otros dibujos, que representan contenidos específicos e invariables del documento.

*Nota:* observación o especificación escrita que acompaña a las representaciones gráficas del plano.

*Referencia:* código de otro documento relacionado o dependiente del documento en cuestión.

#### *Documentos Nuevos:*

Hay dos tipos de documentos nuevos.

*Tipo 1:* documentos generados por Lombardi respecto a la construcción por etapas de las obras de generación, que tenían un documento predecesor elaborado por la CFE. Dentro del rótulo de Lombardi, se agregará la referencia al documento base de CFE.

*Tipo 2:* documentos generados por Lombardi respecto a la construcción por etapas de las obras de generación, que no tenían un documento predecesor elaborado por la CFE.

#### *Documentos Homogenizados:*

Documentos desarrollados por CFE que Lombardi homogeniza/armoniza. Se trata de documentos referidos a ciertas áreas del Proyecto, distintas a las obras de generación, que, sin embargo, guardan relación con aquellas (obras de generación); en éstos se incluyen croquis, vistas o referencias a la obra de generación que se actualiza o modifica, según sea el caso. Estos documentos tendrán rótulo, código y nombre de Lombardi, y logotipo de CELEC, y se versionarán en orden alfabético, según corresponda. Dentro del rótulo de Lombardi, se agregará la referencia al plano base de CFE que se homogeniza, escribiendo su código. Se sentará razón en el rótulo como: "Diseño validado por Lombardi - Documento homogeneizado".

#### *Documentos recodificados:*

Documentos desarrollados por la CFE, actualizados, únicamente, en su rótulo, referencia y notas por Lombardi S.A., en los que no es necesaria ninguna otra intervención. Estos documentos tendrán rótulo, código y nombre de Lombardi S.A., sello de CELEC, y se versionarán en revisión alfabética, según corresponda. Dentro del rótulo de Lombardi, se agregará la referencia al plano base de CFE, escribiendo su código. Se sentará la razón: "Diseño validado por Lombardi S.A. Documento sin modificaciones".

*Acta:* documento que contiene la relación escrita de hechos contractuales tratados o acordados en una junta o reunión entre las partes.

*Trabajo de campo:* se refiere al tipo de trabajo realizado por CFE que se hizo en el sitio del proyecto y su área de influencia, o sea, donde un grupo de trabajo debe transportarse hacia un lugar para tomar mediciones, muestras, registros u otra actividad que solamente puede hacerse en el terreno y de manera presencial.

*Perforaciones:* se refiere a trabajos de campo donde se realizan agujeros, hoyos o pozos dentro de mantos de tierra u rocas, con la finalidad de tomar datos, muestras o realizar ensayos.

*Muestra:* parte o porción extraída de un conjunto, por métodos que permiten considerarla como representativa de él.

*Ensayos:* determinar las características físicas, químicas o mecánicas de la muestra o conjunto de muestras. Los ensayos o investigaciones pueden ser en campo o en laboratorios especializados.

## 1.2 Estructura del informe

El informe está estructurado de la siguiente manera:

En el **Capítulo 2** se presenta la metodología adoptada para desarrollar la documentación completa del proyecto definitivo Santiago. En el **Capítulo 3** se presenta la descripción del proyecto y sus etapas. En los **Capítulos 4, 5 y 6** se proporciona un resumen de los datos principales de la topografía, geología y geotecnia de la zona del proyecto y de las investigaciones realizadas.

El **Capítulo 7** refiere a las escombreras para disposición de material y canteras para extracción de agregados. En el **Capítulo 8** se presentan los estudios realizados para determinar los parámetros de diseño sísmicos.

En el **Capítulo 9** se presentan análisis y resultados de ensayos llevados adelante para las diferentes mezclas de hormigón que componen el proyecto.

En el **Capítulo 10** se describen los diseños referenciales de las ataguías. En el **Capítulo 11** se condensan y describen los análisis realizados para las obras subterráneas y en superficie, detallando la estructura seguida en los apéndices de licitación.

El **Capítulo 12** resume los diseños de auscultación, en tanto que los **Capítulos 13 y 14** refieren a los ensayos de campo que fueron realizados antes sobre hidrología y sedimentación. El **Capítulo 15** detalla los análisis hidroenergéticos que se llevaron a cabo, en tanto que los **Capítulos 16, 17, 18, 19, 20 y 21** resumen los diseños técnicos realizados en hidráulica, estructuras, electricidad y control, mecánica, electromecánica y vialidad. En los **Capítulos 22 y 23** se resumen los estudios de constructibilidad, programa de obra y presupuesto. Finalmente, el **Capítulo 24** resume la evaluación financiera realizada y sus principales indicadores, el **Capítulo 25** presenta las conclusiones que surgen del diseño definitivo, así como recomendaciones para las etapas siguientes de desarrollo del proyecto y cierra el **Capítulo 26** con las referencias.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Marco general para el desarrollo del proyecto definitivo Santiago

Lombardi realizó los estudios de prefactibilidad (Ref. [5]) y (Ref. [4]) donde se determinó que la capacidad de cada grupo sea de 300 MW, con 8 equipos en su primera etapa, y 4 equipos en su segunda etapa. El resto de las obras del proyecto, se construirán todas en la primera etapa.

### 2.2 Desarrollo del proyecto Santiago para su construcción por etapas

Teniendo en cuenta el marco general de trabajo, Lombardi tomó como punto de partida los documentos de prefactibilidad aprobados y procedió a los rediseños, cálculos y especificaciones de las obras de generación, de la presa, y a la homogenización y control de coherencia del resto de las áreas del proyecto.

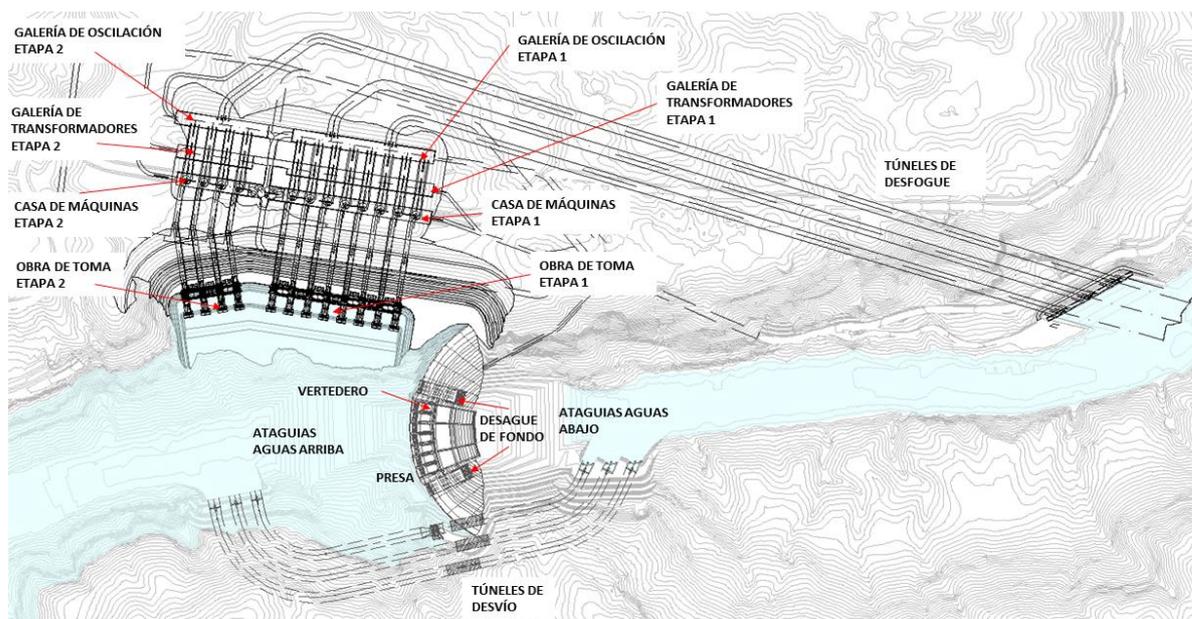
La documentación del proyecto fue estructurada en dos paquetes de documentos. El primer paquete de documentos es para la etapa 1 del proyecto, y consta de todos los apéndices necesarios para llevar adelante la licitación del proyecto.

El segundo paquete de documentos es para la etapa 2 del proyecto, y consta del informe consolidado correspondiente, y la documentación técnica propia de dicha etapa, consistente en planos y especificaciones técnicas. No contiene información de campo, dado que cuando se vaya a construir la etapa 2 ya estará disponible la información propia de la excavación de las cavernas, túneles, rellenos y sostenimientos realizados, la cual será de mayor utilidad y representatividad técnica que las exploraciones realizadas para el presente diseño definitivo.

Los apéndices, memorias y especificaciones indicarán en sus carátulas si corresponden a etapa 1 o a etapa 2. Los planos de la obra de generación indicarán si corresponden a etapa 1, etapa 2 o ambas etapas, en tanto que los planos correspondientes a las otras áreas del proyecto no tendrán esta indicación, dado que serán todos de etapa 1 y no contienen obras a desarrollar en la etapa 2.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El esquema general de obras (**Figura 2**) está conformado por una presa tipo arco-gravedad de hormigón compactado con rodillo de 205 m de altura con vertedero y descargas de fondo integradas al cuerpo de la presa; obra de desvío con tres túneles ubicados en la margen derecha y obra de generación subterránea equipada con seis equipos turbogeneradores tipo Francis en la margen izquierda.



**Figura 2 :** Arreglo general de las obras del P.H. Santiago

#### 3.1 Obra de desvío

El caudal de diseño es de 12 065 m<sup>3</sup>/s, considerando una avenida máxima con periodo de retorno (Tr) de 50 años.

Está integrada por ataguías ubicadas aguas arriba y aguas abajo del eje de la presa; tres túneles localizados en la margen derecha, con sus correspondientes portales de entrada y salida; lumbreras de cierre provisional y cierre final y sus plataformas de operación.

La ataguía aguas arriba cuenta con una altura total de 48,0 m y corona de 184,0 m de longitud a la elevación 343,0 msnm. Su volumen es de 538 700 m<sup>3</sup>. Durante la etapa de construcción de la pantalla impermeable de esta ataguía se habrá construido un bordo de roca (preataguía) con corona a la elevación 322,0 msnm capaz de contener una avenida de 5 000 m<sup>3</sup>/s y que posteriormente y hasta el cierre del desvío formará parte de los materiales graduados, núcleo y pantalla impermeables que se integrarán a la ataguía.

La ataguía de aguas abajo tiene un volumen de 152 500 m<sup>3</sup>, una altura de 25 m y la corona de 122 m de longitud a la elevación 320,0 msnm. La obra queda empotrada en la margen izquierda en rocas masivas de buena calidad, cubiertas parcialmente por depósitos de talud; mientras que la margen

derecha está cubierta por la Fm. Mera con espesores de 35,0 m. La corona de la preatagüa está proyectada a la elevación 308 msnm, lo que permitirá la construcción de la pantalla impermeable de la atagüa aguas abajo.

Los túneles de desvío en su conjunto son capaces de manejar adecuadamente crecidas máximas anuales de 12 065 m<sup>3</sup>/s, pudiendo desalojar hasta 11 293 m<sup>3</sup>/s con velocidades a la salida que no superan los 8 m/s. Son de sección portal de 18,80 x 18,80 m; sus longitudes son 714,30 m (túnel 1), 829,46 m (túnel 2) y 944,62 m (túnel 3).

En la entrada y salida de los tres túneles se excavarán lumbreras de cierre provisional equipadas con compuertas rodantes seccionadas. La lumbrera de cierre definitivo se ubicará en el túnel no.1. El cierre final se realizará mediante un minucioso proceso que contempla cerrar de forma provisional con los obturadores aguas arriba y aguas abajo y de forma definitiva mediante un tapón de hormigón rodeado de una pantalla impermeable primero el túnel 3, posteriormente el túnel 2 y finalizando con la instalación de la compuerta de cierre final y su posterior encofrado de tapón de hormigón e inyectado de pantalla impermeable en túnel 1, para comenzar el llenado controlado del embalse mediante los desagües ubicados en el cuerpo de la presa. Al realizar en modelo físico el cierre para un caudal de 5 000 m<sup>3</sup>/s, considerado como el evento más desfavorable, se determinó que se requiere material con tamaños máximos de 2,25 m para el cierre del río Santiago.

### **3.2 Obra de contención**

La obra de contención está configurada como una presa de tipo arco gravedad, la cual, debido a la búsqueda de un arreglo más compacto del proyecto general, integra sobre la presa a la obra de excedencia.

La presa se considera continua en todo su desarrollo, pero está estructurada por 5 bloques que se dividen en un bloque central y cuatro bloques en las alas:

- El bloque central tiene una longitud aproximada de 150 m.
- Las alas se conforman por 2 bloques en margen izquierda y 2 bloques en margen derecha.

En estos bloques se integran 6 descargadores de medio, los cuales se sitúan 3 sobre margen izquierda y 3 sobre margen derecha los cuales tienen su piso en la cota 345 msnm.

Tiene una altura de 205 m; su nivel de desplante se sitúa en la cota 250 msnm; tiene un ancho máximo en la base a lo largo del río de 109,5 m; su corona tiene un ancho de 10,5 m, una longitud de cresta de 457,4 m y está en la elevación 455 msnm. El volumen estimado de hormigón compactado con rodillo es de 3,2 millones de metros cúbicos y un volumen de 196 000 metros cúbicos de hormigón convencional para las obras que comprenden al vertedero y los desagües de medio fondo.

La presa está situada en un valle relativamente estrecho, con paredes altas y escarpadas, con pendientes entre 45° y 70° para margen izquierda y pendientes entre 35° y 63° para margen derecha, lo cual aporta una ventaja para la construcción de una presa estructurada en forma de arco.

La geometría de la presa se diseñó para garantizar la estabilidad de la estructura y obtener niveles de esfuerzos adecuados en el HCR ante las acciones usuales, inusuales y extremas considerando una vida útil de al menos 100 años.

Se consideró el efecto de interacción de las estructuras del vertedero (pilas, muros, losas y trabes), de los desagües de medio fondo y de las galerías que integran la presa.

El diseño de la presa lo rigió la condición por sismo, que se revisó para dos condiciones; el sismo base de operación (SBO) cuyo periodo de retorno es de 144 años, y fue la condición que rigió el diseño, ya que para esta condición la presa debe permanecer sin daños, así como el sismo de evaluación de la seguridad o sismo máximo creíble (SMC), que corresponde al máximo evento sísmico que puede afectar a la presa, calculado para un percentil del 84%, sismo para el cual la estructura podría presentar la mayor demanda, debe mantener la estabilidad y evitar un desalojo descontrolado del agua.

De acuerdo con los resultados de los análisis térmicos y mecánicos detallados, en principio no sería necesario el post-enfriamiento del HCR. Los análisis mecánicos demostraron que la presa siempre mantendrá el efecto de arco, incluso cuando ésta se haya enfriado totalmente (después de 50 años de construida). Sin embargo, precavidamente se ha proyectado un sistema de inyección de juntas, que se podrá utilizar de acuerdo a los análisis térmicos efectivamente realizados en campo durante la construcción de la presa.

En línea con lo comentado arriba, durante la construcción de la presa se deberá asegurar que el HCR alcance los parámetros considerados en el diseño.

### **3.3 Obra de excedencias**

La obra de excedencias es de tipo controlada y se ubica al centro del cauce, sobre la obra de contención; se compone de manera general por: estructura de control, canal de descarga y estructura terminal. Está diseñada para un caudal máximo de entrada de 21 000 m<sup>3</sup>/s, correspondiente a un periodo de retorno de 10 000 años; el volumen de la avenida de diseño es de 6 904 hm<sup>3</sup>.

La estructura de control está conformada por cimacio, pilas, muros laterales, compuertas, puente de maniobras, vigas testeras y mecanismos de izaje. Cuenta con siete vanos de 16,0 m de ancho por 19,0 m de alto; el cimacio es tipo Creager y tiene una longitud total 112,0 m con elevación de cresta 434,0 msnm y nivel de diseño (NAME) 453,0 msnm.

El control de los volúmenes excedentes se realiza mediante siete compuertas radiales de 15,29 x 19,82 m, con 2 servomotores por compuerta como mecanismo de izaje. El cierre temporal para mantenimiento de las compuertas radiales se hará mediante compuertas auxiliares tipo aguja de 15,50 x 16,59 compuestas de 7 secciones y accionadas mediante grúa pórtico y viga pescadora y colocadas en cada una de las 7 secciones en donde se manejarán las compuertas radiales.

La descarga se divide en tres canales de sección rectangular con rápida de pendiente de 0,6:1, muros, losas y aireadores que corren de extremo a extremo de los muros laterales, conectados cada extremo con una lumbrera de aireación. La capacidad de descarga de los canales laterales es de 5 677,14 m<sup>3</sup>/s cada uno y la del canal central es de 8 515,71 m<sup>3</sup>/s. Los tres canales en conjunto tienen capacidad de desalojar 19 870 m<sup>3</sup>/s.

En el modelo físico se verificó que el patrón de flujo hacia el vertedero presenta un funcionamiento aceptable y que el nivel del embalse para el caudal de diseño es muy similar al teórico. También se representó con fondo móvil el efecto de la socavación ante las descargas del vertedero, concluyéndose que no es necesaria la pre-excavación de un cuenco de amortiguamiento en su totalidad. Para minimizar la erosión regresiva, así como la degradación de los taludes al pie de la presa a largo plazo se contempla el retiro de materiales y tratamiento de taludes en zonas accesibles durante la etapa de construcción.

### **3.4 Obra de desagüe de fondo**

Está conformada por 6 conducciones con elevación de umbral de entrada a la cota 345,0 msnm y sección rectangular con blindaje de acero de 5 m de ancho por 7,2 m de altura, con una longitud promedio de 60,6 m (de compuerta a compuerta) y pendiente nula. La estructura está controlada por 4 compuertas planas deslizantes operadas por servomotores colocadas aguas abajo del conducto, y otras 2 compuertas radiales en los túneles centrales, con compuertas auxiliares planas rodantes en el inicio de la conducción operada con la grúa viajera de la obra de excedencias.

El caudal máximo de descarga total al NAMinO (elevación 415 msnm) es 6 381,49 m<sup>3</sup>/s con una carga de 66,40 m y velocidad de 29,54 m/s. La estructura de descarga aguas abajo de la compuerta de servicio es una cubeta deflectora con un ángulo de salida de 15 grados y una elevación del labio 346,50 msnm. Al igual que la cubeta deflectora de la obra de excedencias, tiene el objetivo de provocar la menor socavación en el cauce y que la posible socavación regresiva no afecte el pie de la presa.

Los desagües de fondo se pondrán en funcionamiento durante el llenado del embalse funcionando a superficie libre y posteriormente durante la operación normal de la central, funcionando a presión, para elevaciones superiores a la cota 390,0 msnm para evitar cavitación y preferentemente inferiores al NAMinO. Esto en concordancia con la política de desalojo de avenidas por el vertedero y en caso de requerirse niveles inferiores en el embalse, evacuarlos a través de la operación de las unidades y finalmente deben proceder con la operación de los desagües de fondo.

### **3.5 Obras de generación**

La obra de generación es de tipo subterránea y se ubica en la margen izquierda del río Santiago. Comprende la obra de toma, ocho conducciones de alta presión para la primera etapa, galería de transformadores, casa de máquinas, galería de oscilación y dos túneles de desfogue. La segunda

etapa tendrá cuatro túneles de alta presión, y sus correspondientes casas de máquinas, galería de transformadores, oscilación y un túnel de desfogue.

El canal de llamada de la obra se ubica en la cota 381,0 msnm y tiene un ancho promedio de 390 m para ambas.

Las bocatomas, diseñadas a base de hormigón hidráulico reforzado, están adosadas al talud excavado en el portal de entrada; cuentan con una estructura de rejillas con forma elíptica, compuertas de servicio tipo vagón y compuerta auxiliar que podrá colocarse en cualquiera de las bocatomas mediante una grúa pórtico controlada desde una caseta de control oleodinámica en la plataforma operativa ubicada en la elevación 455,0 msnm.

El sitio donde se pretende excavar la obra de toma presenta buenas condiciones geológicas. Los tratamientos previstos incluyen drenaje largo sistemático, anclaje de fricción, hormigón lanzado, obras de drenaje, según se detalla en el capítulo 12, diseño geológico-geotécnico.

Las conducciones a presión están formadas por dos ramas en horizontal (superior e inferior) y una rama vertical, unidas por dos codos verticales. La sección transversal de la conducción, después de la transición, será de forma circular, manteniendo un diámetro interno de 8,00 m hasta la boquilla de reducción gradual, terminando con un diámetro interior de 5,80 m en su unión con la carcasa espiral. La conducción estará revestida de hormigón reforzado en el primer tramo horizontal y vertical, iniciando el N metálico a partir del codo inferior.

Las longitudes de los conductos de presión son de 235,7 m para las tuberías 1 a 8 de la primera etapa, y varían de 246,12 m hasta los 272,06 m, medidas desde el inicio de la bocatoma y hasta el paño exterior de la casa de máquinas. El blindaje metálico de los conductos a presión estará revestido de hormigón hidráulico simple y será tratado mediante inyecciones de consolidación y contacto hormigón-placa en la zona de blindaje.

Las galerías de transformadores serán sendas cavernas de 265,0 m de largo por 24,1 m de ancho y 23,45 m de altura interna para la etapa 1, y de 138,50 metros de largo para la etapa 2, manteniendo el resto de las dimensiones. La clave de la bóveda se ubica a la elevación 330,55 msnm y el desplante quedará en la cota 307,00 m. En el extremo sur de la clave de la excavación de la galería de transformadores se ubica la lumbrera de cables, con un diámetro de 4,0 m y una altura de excavación de 244,45 m.

Las cavernas de la casa de máquinas miden 332,50 m de largo por 25,00 m de ancho y 57,00 m de altura para la primera etapa, y 130 m de largo para la segunda etapa, manteniendo el resto de las dimensiones. El caudal turbinado descarga en 12 túneles de aspiración, conformado cada uno por dos vanos de 5,50x10,10 m, y posteriormente pasa a la galería de oscilación. El equipamiento electromecánico de la casa de máquinas comprende de manera general: turbinas, generadores, sistemas auxiliares y sistemas generales. La potencia nominal de cada turbina hidráulicas tipo Francis de eje vertical es de 308,4 MW, con una carga neta de diseño de 135,50 m y un caudal de diseño de 245 m<sup>3</sup>/s. La potencia unitaria en terminales de generador es de 304,8 MW.

Las galerías de oscilación miden 259,00 m de largo por 24,40 m de ancho por 81,00 m de altura para la primera etapa, y 170 metros de largo por 82,4 metros de altura para la segunda etapa, manteniendo el ancho. Se excavará entre las elevaciones 273,00 m a 353,00 m.

Se consideran tres túneles de desfogue trabajando a presión con una sección transversal tipo herradura de 18,0 x 18,0 m, 2 para la primera etapa y uno para la segunda, a través de los cuales se restituye el líquido utilizado por las turbinas hacia el cauce. Sus longitudes son de 1.271,00 m (túnel 1), 1.435,00 m (túnel 2) y 1.721,00 m (túnel 3). Los túneles de la primera etapa inician a la elevación 273,39 msnm y el túnel de la segunda inicia en 272,00 m, todos en su unión con la galería de oscilaciones y terminan en la unión del portal de salida con el canal de desfogue a la elevación 282,00 msnm. Deberán ser recubiertos en su totalidad por hormigón hidráulico convencional reforzado para evitar pérdidas de carga que afecten la potencia comprometida de la central además de un comportamiento aceptable ante los fenómenos transitorios.

Los tratamientos previstos incluyen anclajes de fricción, hormigón lanzado, drenaje y marcos metálicos, según corresponda. El canal de desfogue tiene una sección transversal trapecial y un ancho de 148,0 m en la base. El contrapendiente va de la elevación 282,00 msnm a la elevación 299,50 msnm generando un desnivel de 17,50 m, y se llega a una losa horizontal a la elevación 299,50 msnm, la cual opera como sección de control para conservar la sumergencia necesaria en la central para cuando opere una unidad.

### **3.6 Sistema de auscultación**

El Sistema de Auscultación propuesto para instrumentar las estructuras civiles del proyecto será en su mayor parte automatizado. El diseño considera instrumentar las obras de contención, excedencias, generación, desvío y laderas, además de excavaciones y zonas inestables identificadas.

Para las obras de contención y excedencias se cuantificarán los movimientos relativos entre los bloques de HCR de la presa, con el objetivo de evaluar su comportamiento durante la edad temprana del fraguado del Hormigón, y su estabilidad por el empuje del embalse y subpresión, y particularmente después de sismos de fuente cercana; como es probable que ocurran en el sitio del proyecto. Se medirán las temperaturas del hormigón durante la construcción para conocer su efecto sobre la estructura; para discriminar los cambios volumétricos y desplazamientos debidos a esta variable respecto a los asociados al comportamiento y respuesta de la presa ante las sollicitaciones estáticas y dinámicas.

En la zona de la obra de excedencias, se medirán desplazamientos, esfuerzos y niveles piezométricos a nivel cimentación y en el contacto del HCR y hormigón convencional. A nivel de la cimentación y en la zona de la obra de excedencias, se medirá la magnitud de las presiones, los desplazamientos relativos y la subpresión; para cuantificar la estabilidad de la presa durante el primer llenado y su posterior operación, así como el movimiento relativo provocado por la subpresión y el empuje del embalse en condición estática, además del exceso de presión en la cimentación y el efecto

hidrodinámico del embalse por la probable ocurrencia de sismos fuertes. Así mismo, se medirán los posibles movimientos entre el cuerpo de la presa y la roca de desplante, así como los desplazamientos relativos entre bloques; ya que se espera movimiento de apertura y cierre de juntas constructivas durante la construcción, primer llenado y la etapa de operación.

Se medirá la deformación del HCR en el cuerpo de la presa a diferentes elevaciones, las deformaciones en las pilas del vertedero en la zona de las vigas testeras, las posibles filtraciones a través del HCR y de las juntas constructiva durante su construcción, primer llenado y la etapa de operación.

En la obra de generación se evaluará la estabilidad de cortes y excavaciones en los portales, los desplazamientos de los bloques o cuñas de roca que las pudieran afectar, así como sitios específicos para evaluar el desempeño de los tratamientos de estabilización que se realicen. Para evaluar la estabilidad durante la excavación de las cavernas de casa de máquinas, galerías de oscilación y los túneles, incluyendo el de acceso a casa de máquinas, se medirán las convergencias durante los trabajos de construcción.

En la obra de desvío se evaluará la estabilidad de cortes y excavaciones en los portales, los desplazamientos de los bloques o cuñas de roca que las pudieran afectar, así como sitios específicos para evaluar el desempeño de los tratamientos de estabilización que se realicen.

En las laderas y excavaciones se evaluará la eficiencia del tratamiento de impermeabilización, así como las subpresiones que actúan en los bloques de roca y las estructuras, particularmente en las zonas con riesgo de inestabilidad y las estructuras geológicas principales, ya que la efectividad de los tratamientos de impermeabilización puede verse afectada en caso de la ocurrencia de sismos.

Se medirá el caudal de filtraciones a través de las laderas, lo cual permitirá ubicar cambios en la permeabilidad de la roca, que pudieran estar asociados a destaponamientos, agrietamientos o desplazamientos de discontinuidades, todas ellas situaciones críticas para la seguridad de la obra.

En la zona del anfiteatro y las zonas potencialmente inestables identificadas en el embalse, se deberán medir los movimientos y niveles piezométricos para evaluar su estabilidad durante las etapas de construcción y llenado.

### **3.7 Obras complementarias**

En términos generales se tiene acceso hasta el sitio de la presa a través de la vía interoceánica en el tramo de Patuca hacia Tiwintza, por lo que los caminos parten desde esta vía. La red de vialidades requerida deberá interconectar los diversos frentes de trabajo de modo que se pueda atender adecuadamente las necesidades de construcción conforme a la planeación y programa de obra, dichas vialidades, deberán de ser diseñadas y construidas con características técnicas adecuadas como son ancho de rodamiento, pendientes, revestimiento y señalización, para la circulación de los equipos pesados de construcción. Para los presentes diseños viales, se adoptaron vehículos que se

consideran lo suficientemente representativos de las dimensiones y pesos, sin embargo, los licitantes deberán hacer sus propias evaluaciones y ajustar sus costos para la oferta del proyecto.

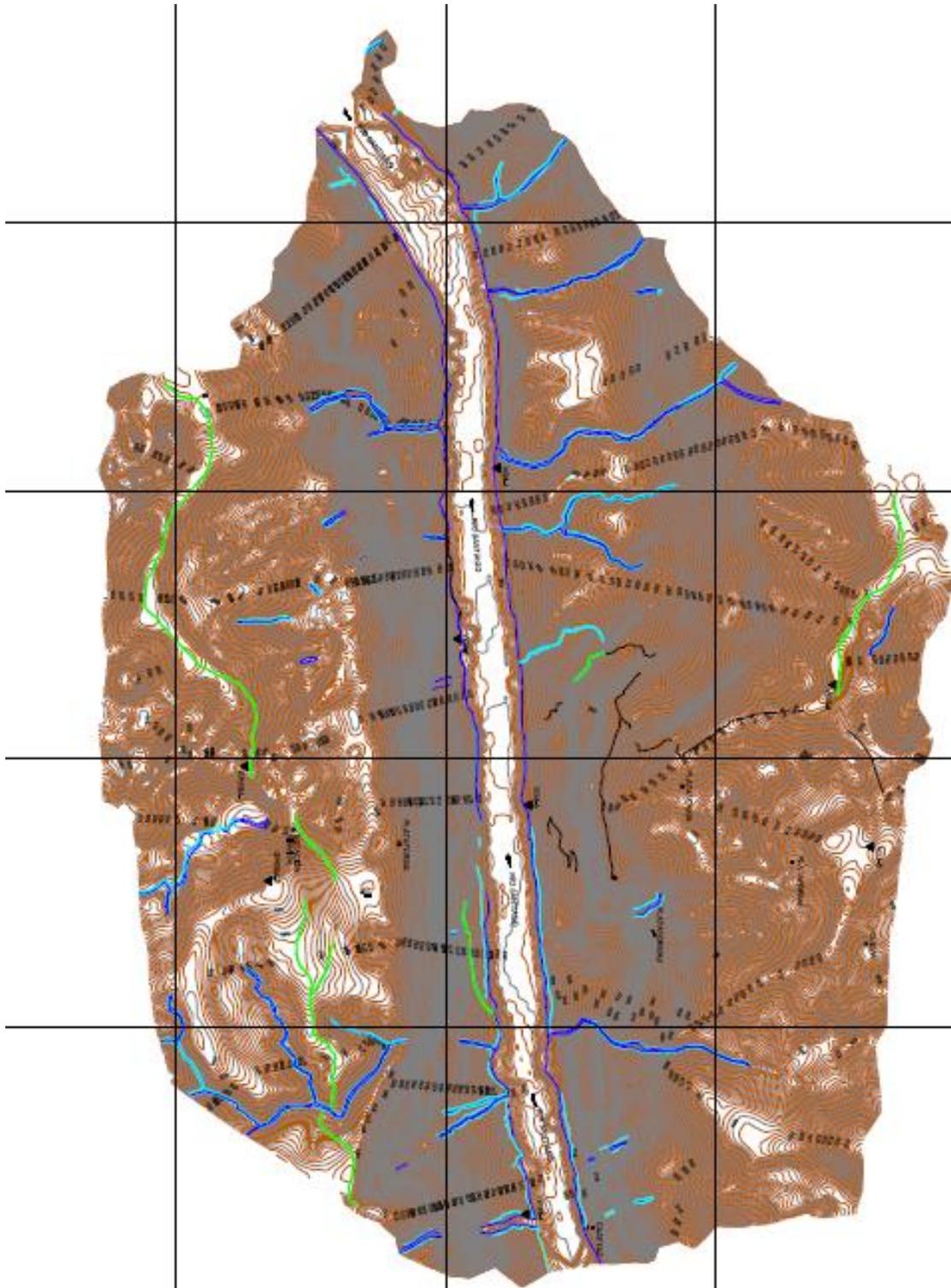
Para el suministro de materiales de construcción a emplear para enrocamientos, filtros y agregados para hormigón se estudiaron el “Banco Calcáreo” y “Banco Yukiantza”, ubicados a una distancia al eje de presa de 0,4 y 6,0 km respectivamente. Cualquiera de los bancos de materiales satisface el volumen para llevar a cabo la obra. Para el caso de enrocamientos y filtros de las ataguías también se podrán utilizar las areniscas brechoides y brechas vulcano-sedimentarias (unidad masiva), producto de las excavaciones del proyecto.

La presa será la obra que requiera el mayor consumo de agregados para hormigón y conforme a los estudios y diseños de mezclas de hormigón realizados, se ha identificado que la fuente principal de suministro será el banco Calcáreo.

De acuerdo a los parámetros geotécnicos evaluados, el material de los bancos Calcáreo y Yukiantza, así como algunos estratos de los materiales producto de la excavación de obras (arenisca brechoide y brecha vulcanosedimentaria), presentan características adecuadas para ser empleados en la construcción de las ataguías como filtros y transiciones.

## 4. TOPOGRAFÍA

En el proyecto 2 016 se desarrollaron los relevamientos topográficos y batimétricos en las zonas de la boquilla y los ríos Zamora, Namangoza y Santiago; nivelación diferencial de la cota del embalse; y monitoreo topográfico de la zona del Anfiteatro.



**Figura 3** : Configuración topográfica de detalle y batimetría del río Santiago

## 5. GEOLOGÍA

### 5.1 Litología

El P.H. Santiago se coloca en el sector oriental de la cordillera andina en una zona caracterizada por unidades geológicas de edad que varía desde el Jurásico Inferior al Cuaternario. La Formación Santiago representa el sustrato más antiguo que fue intruido en el Terciario por diques dioríticos; después de un periodo de erosión entre el Neógeno y Paleógeno se depositaron en el valle del río Santiago secuencia de lahares de la Formación Mera y depósitos no consolidados recientes. La **Figura 4** ilustra la columna estratigráfica del sitio y a continuación, se describen las características de cada unidad.

ERA	PERIODO	ÉPOCA	COLUMNA	LITOLOGÍA
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Qre Qdt	Suelo Residual Qre.- Material limo arcilloso débilmente consolidado. Depósitos de Talud Qdt.- Fragmentos de roca angulosos al pie del cantil.
		Pleistoceno	TQ-m	Formación Mera TQ-m.- Aglomerado constituido por clastos de composición andesítica de diferente tamaño, englobados en una matriz arenosa, poco consolidada.
	Terciario	Neógeno		
		Paleógeno	T-dab	Intrusivo Intermedio-Básico T-dab.- Cuerpos intrusivos y diquestratos de composición diorítica a diabásica, color gris verdoso, con textura afanítica a porfídica, normalmente con intensa alteración por óxidos de hierro y propilitización.
MESOZOICO	Cretácico	Inferior		
			J-s (cz)	Formación Santiago J-s.- Constituida por una secuencia vulcanosedimentaria J-s(vs) y en la cima un paquete calcáreo J-s (cz) Paquete Calcáreo J-s (cz).- Intercalaciones de calcarenitas de grano grueso a medio y brechas de composición calcárea, en estratificación mediana a gruesa y color gris claro.
	Jurásico	Inferior	Im	Secuencia Vulcanosedimentaria J-s (vs).- Rocas de origen volcánico y sedimentario depositadas en ambiente marino. Unidad estratificada: Im.- Alternancia de limolitas y areniscas de grano muy fino, de color gris oscuro a negro con estructura laminar.
			Ar J-s (vs)	Ar.- Areniscas tobáceas de grano fino a medio, de color gris claro a gris verdoso.
			Ab Bv	Unidad masiva. Ab- Areniscas brechoideas de color gris verdoso a gris claro. Bv.- Brechas vulcanosedimentarias de color gris a gris oscuro.

**Figura 4** : Columna litológica del sitio de estudio Fm. Santiago (J-s)



**Figura 5:** Fotografía aérea donde se ilustran los límites por falla de los bloques que segmentan al macizo rocoso en la zona de estudio.

## 5.2 Condiciones geológicas en las zonas de la presa

La presa está situada en un valle relativamente estrecho en forma de “U” abierta asimétrica, con paredes altas y escarpadas, producto de la buena competencia y calidad de las rocas.

Para el desplante de la cortina en ambos márgenes se considera el retiro de aproximadamente 20 m de espesor de roca, de los cuales se estima que los primeros 10 m estén compuestos por roca descomprimida y alterada. En la porción superior a la corona de la cortina, se incluirán cortes de roca de taludes y bermas que se desarrollarán en su mayor parte en areniscas limolitas de estratificación delgada. Los apoyos de la cortina en las laderas generalmente quedarán desplantados en alternancia de paquetes estratificados y masivos.

En el cauce del río se determinaron espesores importantes de materiales aluviales y depósitos poco consolidados de la Fm. Mera, constituidos ambos por fragmentos de diferente tamaño, se considera que en ocasiones llegan a existir bloques mayores de 2 m<sup>3</sup>. El espesor de estos materiales en la zona de desplante de la presa es del orden de 35 a 40 m. El desplante a la cota 245 m, quedará sobre la cima de un delgado horizonte de 6 m de arenisca brechoide. Todo el macizo rocoso que está por debajo de los materiales aluviales (cota 255 a la 220 m) presenta velocidades mayores a 3 600 m/s y un RQD mayor al 85 %. (**Figura 6**).

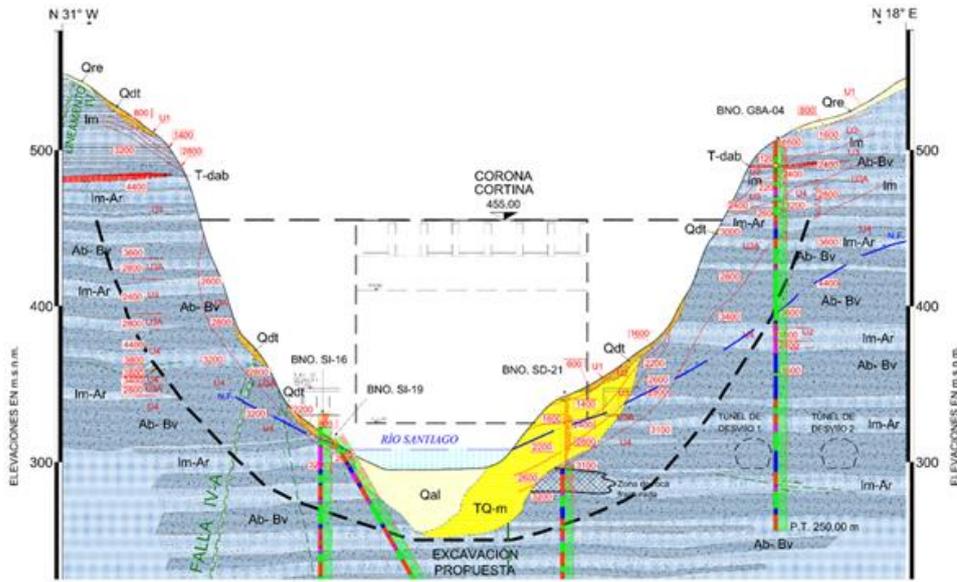


Figura 6: Sección geológica del eje de cortina curvo.

## 6. GEOTECNIA

### 6.1 Trabajos de campo y laboratorio

Los trabajos de ensayos fueron realizados en el proyecto 2 016. Los trabajos de campo incluyeron: levantamientos geomecánicos de barrenos y en afloramientos; ejecución de pruebas de deformabilidad en barrenos empleando gato Goodman; ejecución de pruebas de absorción de agua a presión y selección de muestras para la ejecución de pruebas índice, mecánicas y dinámicas en laboratorio. Las pruebas de laboratorio se emplearon para definir las propiedades índice, mecánicas y dinámicas de la roca intacta para su posterior extrapolación a la escala del macizo rocoso. Por otro lado, se definieron los parámetros de resistencia al corte de diferentes sistemas de fracturamiento, para ello se emplearon muestras extraídas de barrenos, así como muestras cúbicas de los socavones de exploración.

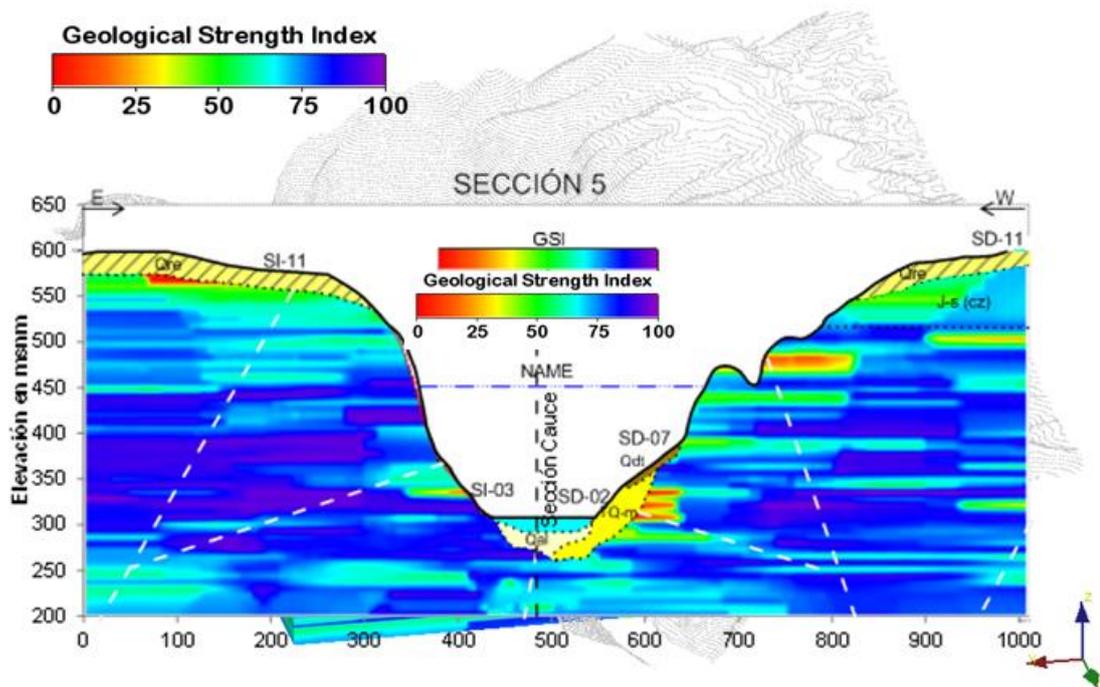
### 6.2 Clasificación geomecánica de los materiales

Para evaluar la calidad del macizo rocoso, se clasificaron las diferentes litologías del proyecto con la metodología GSI (Geological Strength Index), para ello se empleó la información de afloramientos de roca y levantamientos ejecutados en los núcleos recuperados de barrenos.

La distribución en el espacio de propiedades básicas de la roca intacta y discontinuidades fue útil para clasificar el macizo rocoso y definir su deformabilidad, lo que se presenta en la **Tabla 2** y a manera de ejemplo, una sección de la boquilla en la **Figura 7**.

GSI	Ubicación
<b>GSI&lt;40</b> Macizo rocoso de regular a mala calidad	Zonas cercanas a la superficie, principalmente en el tercio inferior de la altura de la presa. Se presentan como zonas puntuales con continuidad lateral limitada. Esta condición es más probable en la unidad estratificada.
<b>GSI de 40 a 60</b> Macizo rocoso de regular calidad	Se ubica en un mayor porcentaje en zonas superficiales y se puede profundizar hasta 50 m dentro del macizo rocoso en algunos casos. Se puede observar esta condición de forma puntual en zonas profundas, principalmente en el cruce con fallas o en la unidad estratificada.
<b>GSI&gt;60</b> Macizo rocoso de buena calidad	Se ubican de forma puntual en zonas superficiales, principalmente en la margen izquierda. Zonas no afectadas por fallas en prácticamente cualquier unidad litológica y en zonas con cobertura de roca mayor a 50 m

**Tabla 2:** Ubicación espacial de diferentes rangos de GSI.



**Figura 7:** Distribución aproximada de valores de GSI en la Sección 5.

Como se observa, la calidad de la roca es mayoritariamente buena a muy buena, debiendo mejorar los sostenimientos solo al pasar por zonas de falla o estratificación.

## 7. HIDROLOGÍA

### 7.1 Localización del proyecto en el contexto hidrológico

El P-H. Santiago se ubica en la Demarcación Hidrográfica Santiago, en la parte suroriental de la República de Ecuador, en la región hidrográfica del Amazonas. El sitio del proyecto se encuentra en la provincia de Morona Santiago en los cantones Tiwintza y Limón Indaza; el eje de presa se encuentra en el río Santiago entre la confluencia de los ríos Zamora y Namangoza, y la confluencia del río Santiago con el río Coangos, en las coordenadas UTM N 9 665 600 m y E 809 400m Datum SIRGAS Ecuador 1995, zona 17. El embalse involucra a los cantones de Tiwintza, Limón Indaza y Santiago de Méndez, y los ríos Santiago, Zamora, Namangoza, Upano, Paute y Negro, ver **Figura 8**. Los datos utilizados para determinar los caudales corresponden a 28 estaciones con mediciones de 1 964 a 2 013, registros de CH Mazar (2 010 – 2 014), CH Molino (1 984 – 2 014) y aforos 2 014/2 015 con 5 estaciones cercanas al sitio del proyecto.

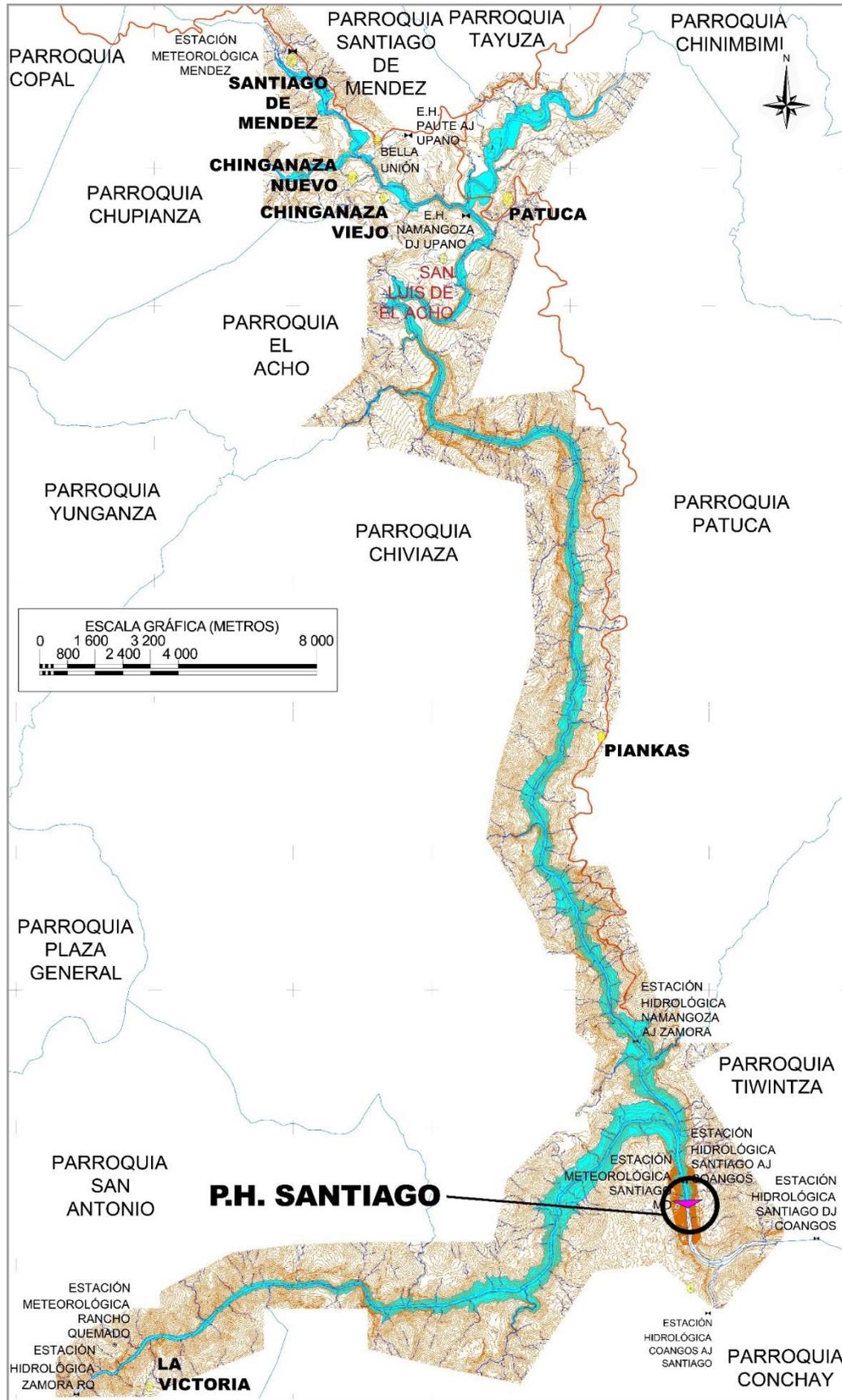


Figura 8: Embalse proyecto hidroeléctrico Santiago

La subcuenca del río Zamora nace en el extremo sureste del país, en las alturas de las cordilleras Central de los Andes y del Cóndor (ésta última limítrofe con Perú) y fluye en dirección Este y luego hacia el Sur, hasta unirse con el río Zamora para formar el río Santiago, que fluye hacia el Este y es afluente del río Marañón, que a su vez desemboca en el río Amazonas. El área total hasta el sitio de la presa del PH Santiago es de 22 259 km<sup>2</sup>.

## 7.2 Caudales

El caudal de diseño para la obra de excedencias del PH Santiago, correspondiente al periodo de retorno de 10 000 años, y los asociados a diferentes periodos de retorno, se definen sumando los caudales de las subcuencas de los ríos Zamora y Namangoza.

Río Zamora		Río Namangoza		Caudales de diseño PH Santiago	
Periodo de retorno [años]	Caudal [ m <sup>3</sup> /s]	Periodo de retorno [años]	Caudal [ m <sup>3</sup> /s]	Periodo de retorno [años]	Caudal [ m <sup>3</sup> /s]
2	3 200	2	2 909	2	6 109
5	4 124	5	3 895	5	8 019
10	4 736	10	4 547	10	9 283
20	5 322	20	5 173	20	10 495
50	6 082	50	5 983	50	12 065
100	6 651	100	6 590	100	13 241
200	7 218	200	7 195	200	14 413
500	7 967	500	7 993	500	15 960
1 000	8 532	1 000	8 596	1 000	17 128
2 000	9 097	2 000	9 199	2 000	18 296
5 000	9 845	5 000	9 996	5 000	19 841
10 000	10 410	10 000	10 599	10 000	21 009

**Tabla 3:** Caudales de diseño de los ríos Zamora, Namangoza y PH Santiago.

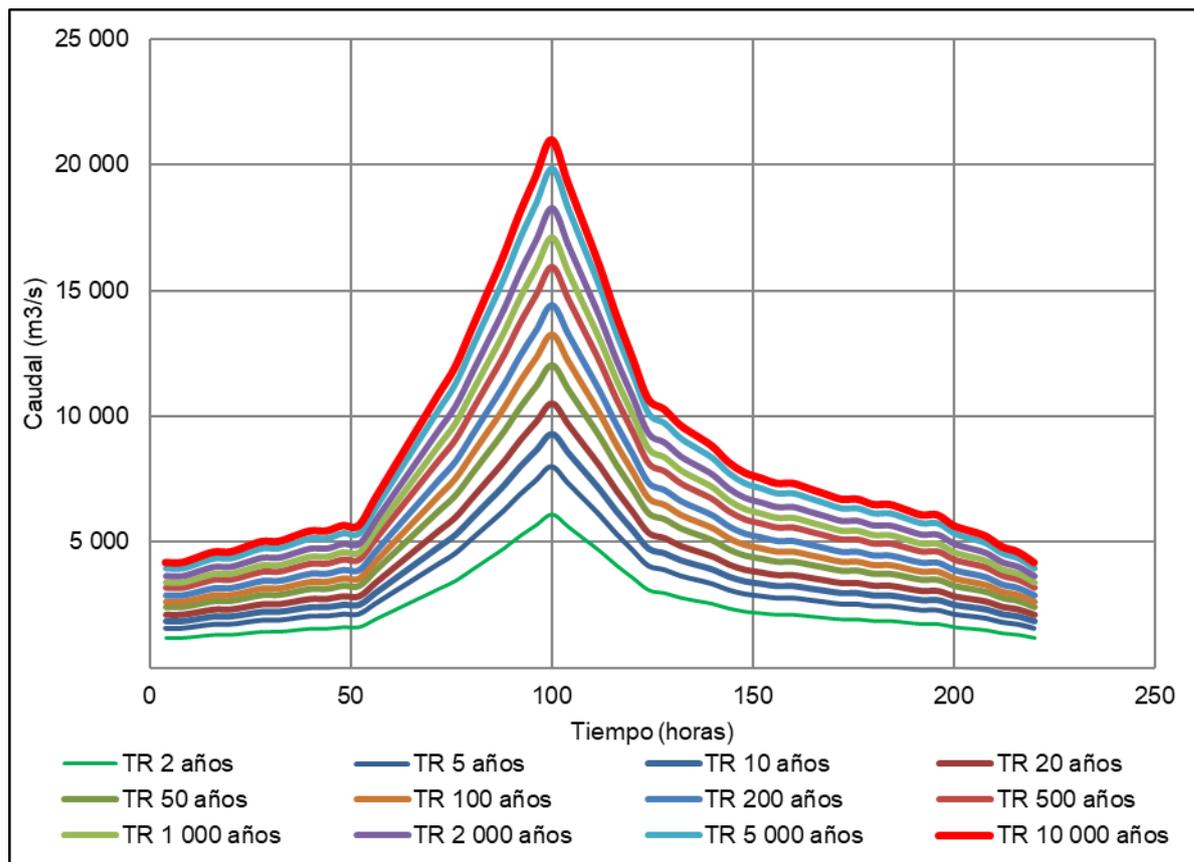


Figura 9: Hidrogramas de diseño del PH Santiago.

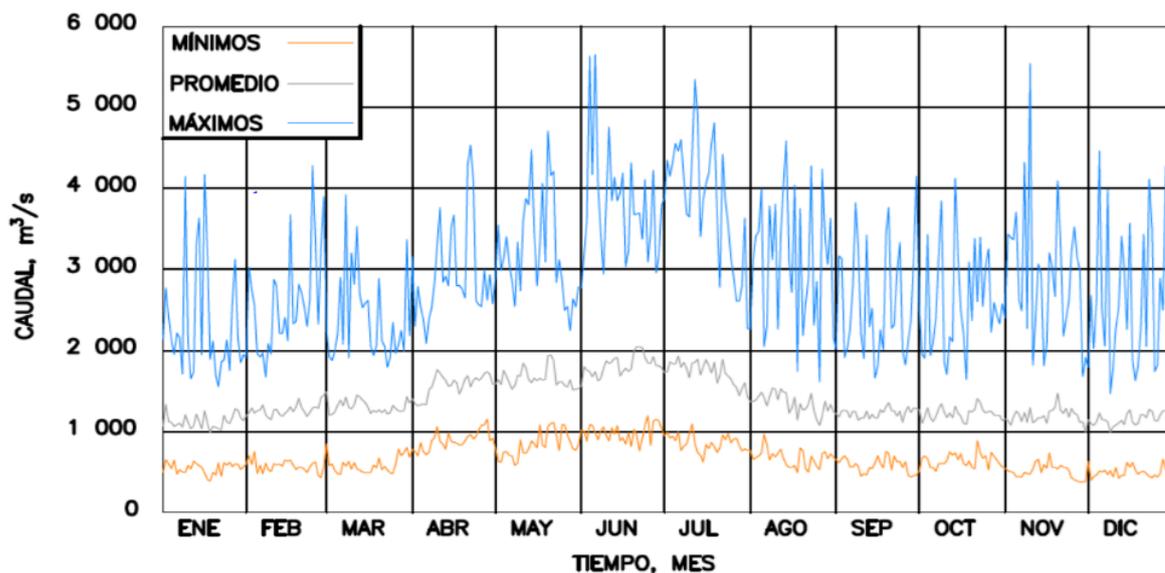


Figura 10: Historial de caudales para el PH Santiago.

El caudal medio anual es de 1 385 m<sup>3</sup>/s.

## 8. SEDIMENTOS

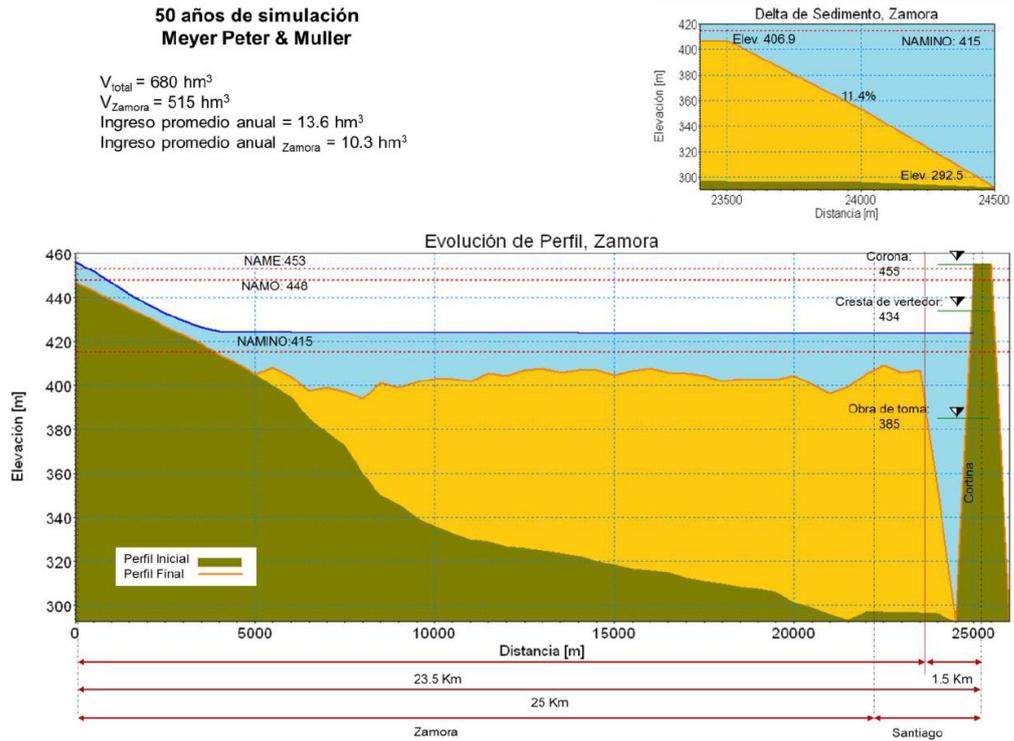
Con el propósito de estimar la cantidad de sedimentos que llegan al embalse del PH Santiago, y su evolución, así como la cantidad de sedimento que pasaran por la obra de generación, se actualizaron estudios de la etapa de factibilidad utilizando la formula universal de perdida de suelo con el modelo numérico MIKE-11 para los ríos Zamora, Namangoza y Santiago en el área del proyecto.

### 8.1 Resultados de la modelación

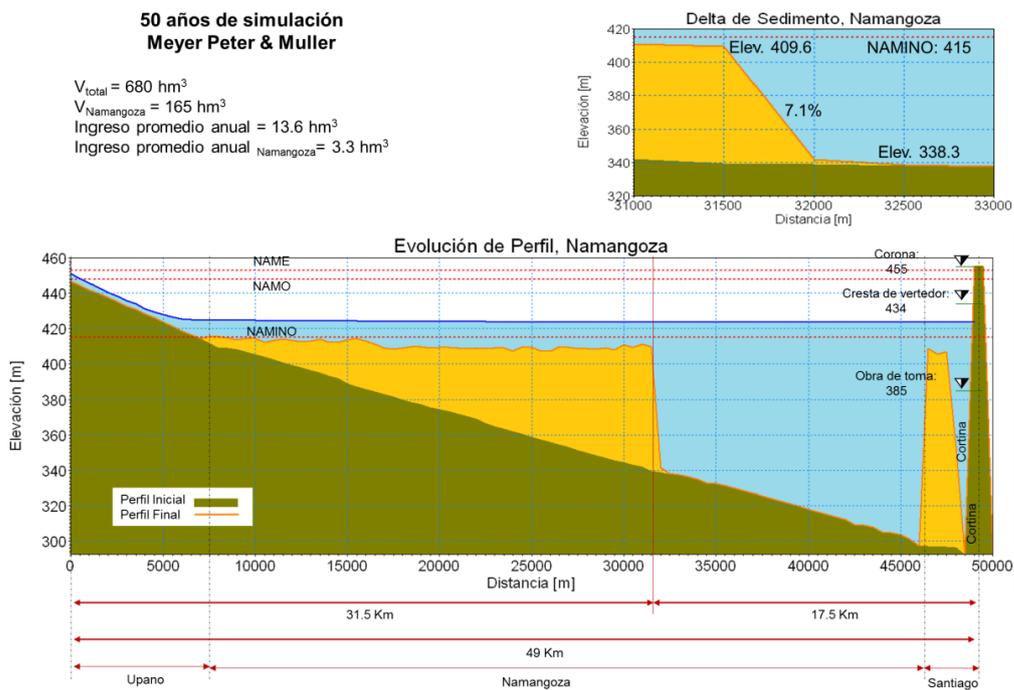
De acuerdo con los resultados de modelación, en la **Figura 11** y **Figura 12** se muestran respectivamente los cambios morfológicos de los cauces Zamora y Namangoza. Puede apreciarse un azolvamiento del orden del 95% de la longitud del embalse por el río Zamora y del 60% en el caso del río Namangoza. Los cálculos con el modelo numérico se realizaron tanto con el método de transporte de sedimentos de Engelund Fredsoe como Meyer Peter & Muller, considerando un ingreso promedio de 13.6 hm<sup>3</sup>/año. El volumen de ingreso de sedimentos al embalse es de 680 hm<sup>3</sup> en un lapso de 50 años, estimado con mediciones.

Las diferencias de azolvamiento entre el embalse por ambos ríos se deben a la distribución del ingreso de agua por los ríos Zamora y Namangoza (60% vs 40% respectivamente) y a la mayor aportación de sólidos del río Zamora con respecto al río Namangoza (75% vs 25% respectivamente).

Cabe señalar que el modelo numérico fue calibrado de acuerdo con los datos obtenidos en las campañas de medición, por lo que los escenarios de modelación correspondieron a condiciones actuales, considerando la operación de la presa y para tres eventos extraordinarios con periodo de retorno de 100 años.



**Figura 11:** Cambio morfológico a 50 años (Meyer Peter & Muller), para el río Zamora – (Presa Est. 24+000).



**Figura 12:** Cambio morfológico a 50 años (Meyer Peter & Muller), río Namangoza y Santiago – (Presa Est. 48+000).

## **8.2 Conclusiones del Estudio de Sedimentos**

El volumen de sedimentos acumulados es de 515 hm<sup>3</sup> en el río Zamora y de 165 hm<sup>3</sup> en el río Namangoza en 50 años (10.3 hm<sup>3</sup> y 3.3 hm<sup>3</sup> promedio respectivamente). El volumen de sedimento capturado en el embalse en un período de 50 años es de 680 millones de m<sup>3</sup>.

Cabe señalar que, para las simulaciones numéricas de Transporte de sedimentos, se realizaron ciertas consideraciones que se consideran como “criterios conservadores de cálculo” para los propósitos del estudio, y también por cuestiones que resultan difíciles de establecer a largo plazo porque tienen gran incertidumbre, tales como la cantidad y composición granulométrica del sedimento transportado por los ríos en el tiempo, los cuales se definirán conforme se realice mayor número de mediciones, inclusive por ciclos anuales.

## 9. ESTUDIO HIDROENERGÉTICO

### 9.1 Análisis plan maestro de electrificación 2018 - 2027

En el ámbito de la actualización de los diseños definitivos, la contextualización del proyecto hidroeléctrico Santiago con respecto al Plan Maestro de Electricidad vigente es de considerable relevancia para los estudios necesarios a la definición del tamaño óptimo del proyecto y estrategia de construcción de este por etapas. En particular, los estudios no pueden prescindir de un análisis de la previsión de la demanda eléctrica esperada para el país en el medio-largo plazo.

En acuerdo al Plan Maestro de Electricidad (2018-2027), en adelante PME, considerado como base para el análisis, la previsión de aumento anual de la demanda eléctrica se basa sobre tres diferentes hipótesis, Tendencial, Caso Base y Caso Matriz Productiva.

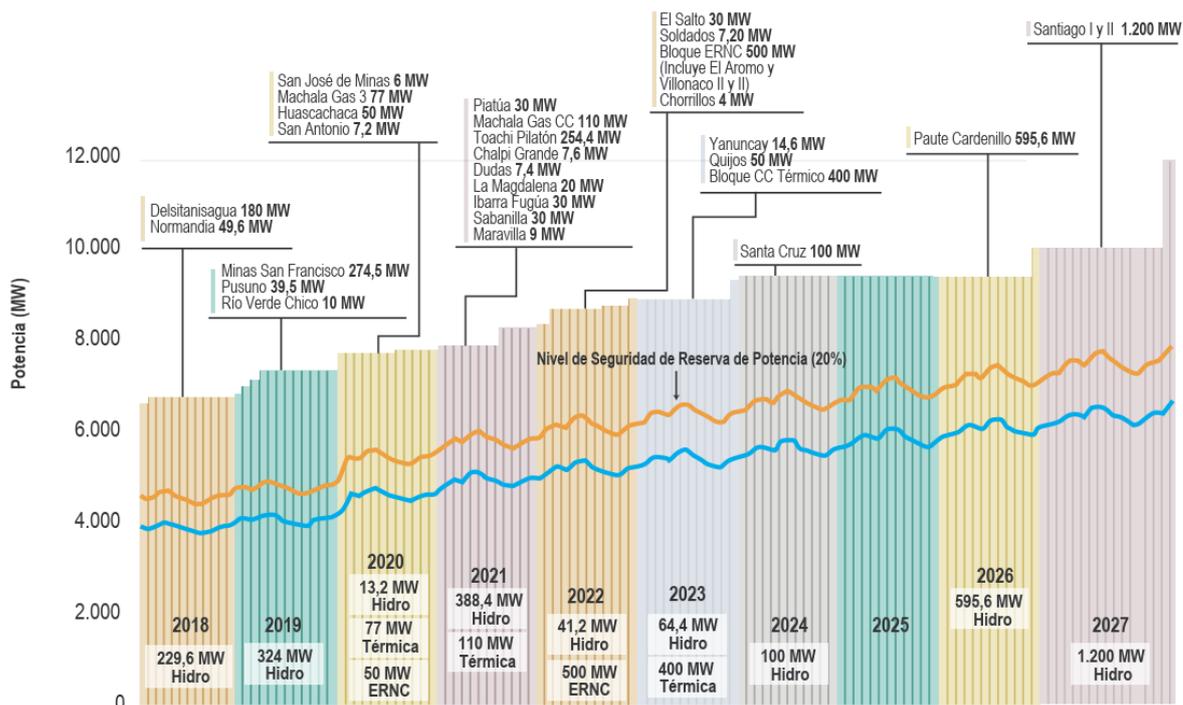
En las consideraciones realizadas se tienen debidamente en cuenta las conclusiones del análisis del consumo interno, en las diversas situaciones consideradas, y más precisamente, con referencia al “caso base” y al “caso matriz productiva”, a fin de proporcionar una evaluación fiable de las necesidades previstas hasta 2027. Además, se considera la presencia de dos interconexiones internacionales a Colombia y Perú en el balance general.

Se espera que entren en servicio o se construyan varias otras centrales eléctricas, distribuidas entre los diversos tipos de fuentes de energía, pero con una potencia total significativamente menor que el total de las que serán alimentadas por la fuente hidráulica. Este última tiene un potencial económicamente viable en el Ecuador estimado en unos 22 000 MW, de los cuales el 23,04% ya está explotado hasta 2018.

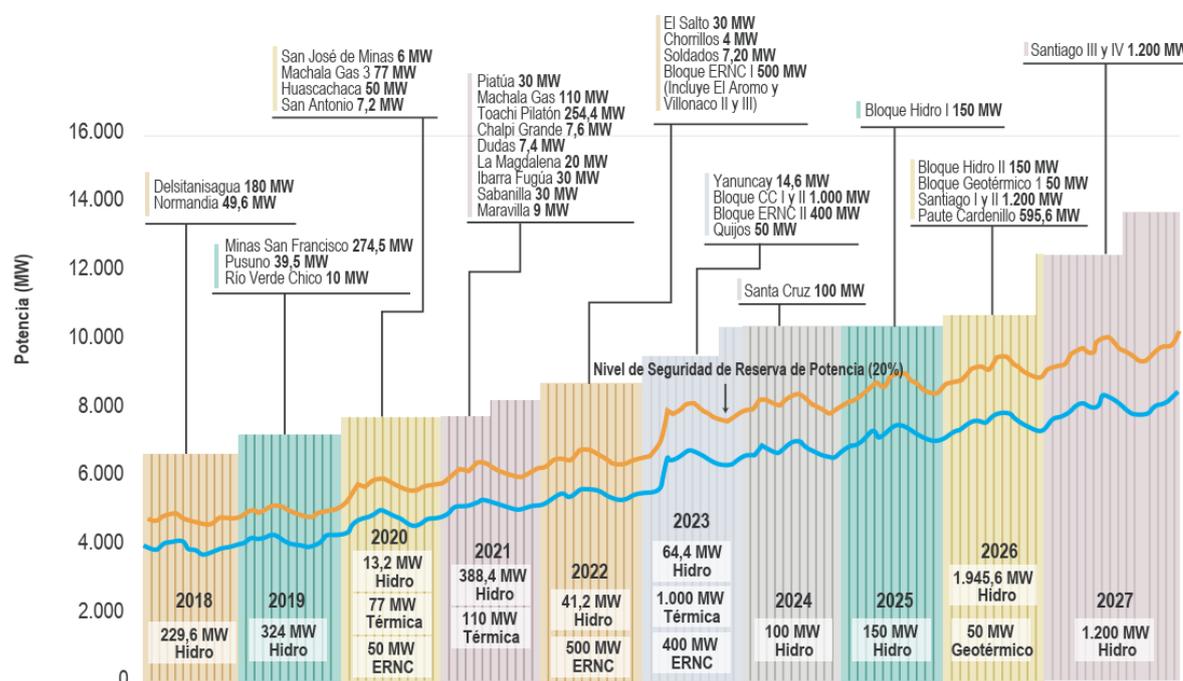
El PME [1] a través de la simulación, ha desarrollado dos posibles escenarios futuros:

- a) Plan de Expansión de Generación 2018 - 2027, Caso Base. Considera la Proyección Tendencial más la adición de cargas singulares, es decir: demandas industriales vinculadas con la actividad minera, camaroneras, cemento, siderúrgica, transporte, bombeo, sistema petrolero público y privado; proyectos de eficiencia energética, abastecimiento a la ciudad del Conocimiento, obras portuarias e industria molinera.
- b) Plan de Expansión de Generación 2018 - 2027, Caso Matriz Productiva. Incluye la demanda del Caso Base y las cargas adicionales de las industrias básicas impulsadas por el Gobierno Nacional, tales como: industria del aluminio, petroquímica, industria del cobre, puerto comercial y astilleros

Las consideraciones del PME que se han resumido brevemente en párrafos anteriores se traducen en dos cuadros de desarrollo de generación de electricidad, que siguen básicamente las dos hipótesis mencionadas "caso básico" (**Figura 13**) y "caso matriz productiva" (**Figura 14**).



**Figura 13:** Secuencia de entrada de proyectos y curvas de demanda máxima de potencia del SNI, PEG 2018 – 2027, Caso Base (PME, cap. 4: Figura Nro. 4-10 [1]).



**Figura 14:** Secuencia de entrada de proyectos y curvas de demanda máxima de potencia del SNI, PEG 2018 – 2027, Caso Matriz Productiva (PME, cap. 4: Figura Nro. 4-11 [1]).

En ambos casos, dada la magnitud y el impacto del proyecto hidroeléctrico Santiago, que se muestra en los diagramas como fase I, II, III y IV (para una capacidad total instalada de 2 400 MW), es evidente que su presencia es esencial para cumplir tanto con los requisitos de energía necesarios como con las reservas correspondientes hasta el año 2027. Los dos escenarios sólo proporcionan una distinción

temporal para la entrada en funcionamiento de parte del PH de Santiago, adelantada en el caso de la Matriz Productiva por las mayores necesidades energéticas relacionadas con ella.

Cabe destacar que Santiago representa también una garantía adicional más allá del año 2027, cuando la plena explotación del recurso hidráulico podría lograrse mediante la instalación de una sección de potencia adicional de 1 200 MW (alcanzando el total esperado en el proyecto base 2016 de 3 600 MW **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esto permitiría agregar un margen adicional de seguridad y estabilidad al sistema eléctrico Nacional, en los siguientes casos:

- crecimiento persistente del consumo interno de electricidad;
- acuerdos de cesión de energía a países vecinos interconectados;
- potenciales faltas de eficiencia que pudieran ocurrir en otras plantas de importancia nacional;
- reserva de potencia fácilmente utilizable en caso de necesidad del sistema interconectado nacional.

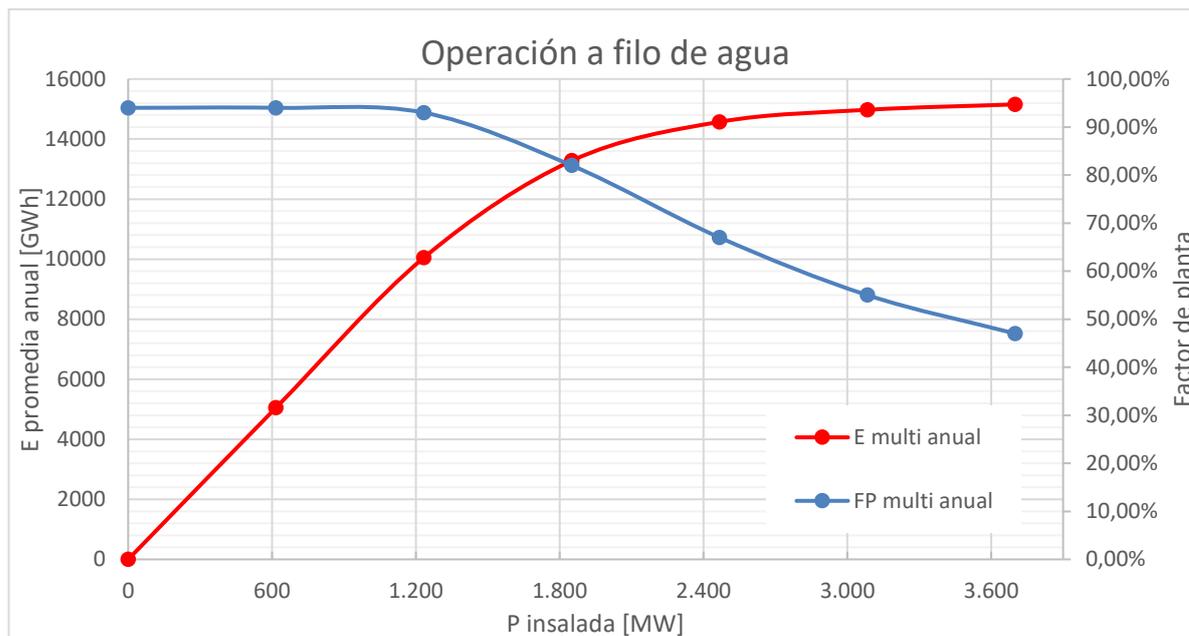
## 9.2 Expansión de la transmisión

En caso de que todas las obras previstas en el Plan de Expansión de Transmisión se completen en las fechas establecidas en el PME [1], el Proyecto Hidroeléctrico de Santiago estará en las mejores condiciones posibles para contribuir adecuadamente al desarrollo del Ecuador. En este escenario no hay problemas para la transmisión de la producción del PH de Santiago, aunque después de 2027 se prevé proceder a la segunda fase del mismo proyecto, con la instalación de los 1 200 MW restantes, para completar el total previsto de 3 600 MW.

## 9.3 Estimación de la producción

Producción a Filo de agua		
Cantidad de grupos	8 unidades	12 unidades
Energía anual	14 573 GWh-año	15 154 GWh-año
Factor de planta	0,67	0,47

**Tabla 4:** Resultados de los principales parámetros de producción a filo de agua.



**Figura 15:** Energía anual – Potencia instalada – Factor de planta a filo de agua

Producción a pico – 4 horas diarias (19 -23)		
Cantidad de grupos	8 unidades	12 unidades
Energía anual total	14 555 GWh-año	15 046 GWh-año
E anual pico (19 – 23)	3 251 GWh-año	4 097 GWh-año
E anual base (23 – 19)	11 304 GWh-año	10 949 GWh-año
Factor de planta	0,67	0,46

**Tabla 5:** Resultados de los principales parámetros de producción a pico.

Energía firme y estacional		
Cantidad de grupos	8 unidades	12 unidades
E firme	9 346 GWh-año	9 487 GWh-año
E secundaria	5 227 GWh-año	5 667 GWh-año
E temporada seca	6 439 GWh-año	6 566 GWh-año
E temporada lluviosa	8 134 GWh-año	8 588 GWh-año

**Tabla 6:** Resultados de los principales parámetros de producción en firme y estacional.

Según la regulación No. CONELEC-007-00, la energía firme en el mercado eléctrico se define como la producción efectiva de una planta hidráulica, en un período dado que, en función de los caudales mensuales aportados y la capacidad del reservorio, asegure una probabilidad de ocurrencia del 90%.

## 10. PRESUPUESTO Y PROGRAMACIÓN DE OBRA

### 10.1 Presupuesto etapa 1

El importe total referencial estimado para la etapa 1 del aprovechamiento hidroeléctrico Santiago es de 3 052 941,626 millones de dólares, actualizado a enero 2021, siendo el agregado ecuatoriano del proyecto el 33 %.

RESUMEN GENERAL DEL PRESUPUESTO PROYECTO PH SANTIAGO ETAPA 1 (MONTOS ACTUALIZADOS A ENERO 2021)		\$ 3.052.941.626
LICITACIÓN PH SANTIAGO (Considera el 39,14% de Indirectos)		\$ 2.721.854.448
1	Licitación modalidad Precios Unitarios	\$ 1.539.499.344
1.1	Instrumentación para la Obra Civil	\$ 13.471.846
1.2	Obra Civil de Superestructuras	\$ 1.483.055.666
1.2.2	Obra de Contención	\$ 488.011.472
1.2.3	Obra de Excedencias	\$ 150.016.040
1.2.4	Obra de Generación - Obra de Toma y Tuberías de Presión	\$ 325.986.880
1.2.5	Obra de Generación - Casa de Máquinas Subterráneas y Obras Anexas	\$ 186.296.989
1.2.6	Túneles de Aspiración - Galerías	\$ 315.634.277
1.2.7	Obra de Generación - Subestación	\$ 17.110.008
1.3	Escombreras	\$ 20.061.358
1.4	Vialidad	\$ 22.910.473
1.4.1	Vía de acceso a la corona de la presa	\$ 4.777.352
1.4.2	Vía de acceso a CM, SE y DF (Inc. Túnel)	\$ 18.133.121
2	Licitación modalidad: Costo Fijo	\$ 1.182.355.104
2.1	Equipamiento Electromecánico	\$ 926.101.334
2.2	Obra de Desvío	\$ 256.253.770
PARTIDAS INTERNAS DE CELEC EP		\$ 331.087.179
	Planes de Manejo Ambiental responsabilidad del promotor	\$ 67.363.592
	Reposición de Infraestructura	\$ 29.332.679
	Pago de tasas del Inventario Forestal	\$ 3.357.806
	Administración del Proyecto	\$ 40.000.000
	Gerenciamiento y Fiscalización	\$ 120.000.000
	Ingeniería de Detalle	\$ 71.033.102

Tabla 7: Presupuesto referencial del proyecto etapa 1

### 10.2 Programa de obra etapa 1

Con base en la planeación estratégica, los procedimientos constructivos y los rendimientos planteados en el estudio de Constructibilidad, se estableció la duración de las actividades que conforman el programa general de obra del proyecto.

El periodo mensual de construcción empleado para la programación de las alternativas está integrado por 26 días efectivos realmente trabajados contemplando días de asueto y horas efectivas trabajadas. Para trabajos en obras exteriores y subterráneas se propuso emplear turnos de 8 horas (3 turnos) que cumplan con 20 horas efectivas de trabajo por día (tiempo estimado por eficiencia) durante 6 días a la semana

El programa de obra plantado contiene el desglose de actividades para la obra electromecánica y su interacción con la obra civil, lo que da mayor certeza al tiempo para la puesta en marcha y operación de las unidades generadoras.

Se divide en 6 grandes grupos que contemplan lo siguiente, y tiene una duración total de **72 meses** para la puesta de operación de 8 unidades:

- Actividades previas y caminos de construcción.

- Obra de desvío
- Obra de contención
- Obra de Excedencias
- Obra de generación – Etapa 1
- Obra electromecánica
- Pruebas, sincronización y operación de unidades.

El camino crítico pasa por los caminos constructivos de llegada a la obra de toma, la excavación de la obra de toma, sus hormigonados e instalación del equipamiento electromecánico. Luego, la construcción de la presa y la habilitación de los portales de las obras de desvío, son dos ramas que tienen baja flotación, y pueden volverse críticas frente a atrasos de sus actividades. En la **Figura 16** se presenta un resumen del cronograma, el cual en su forma completa tiene 700 actividades analizadas.

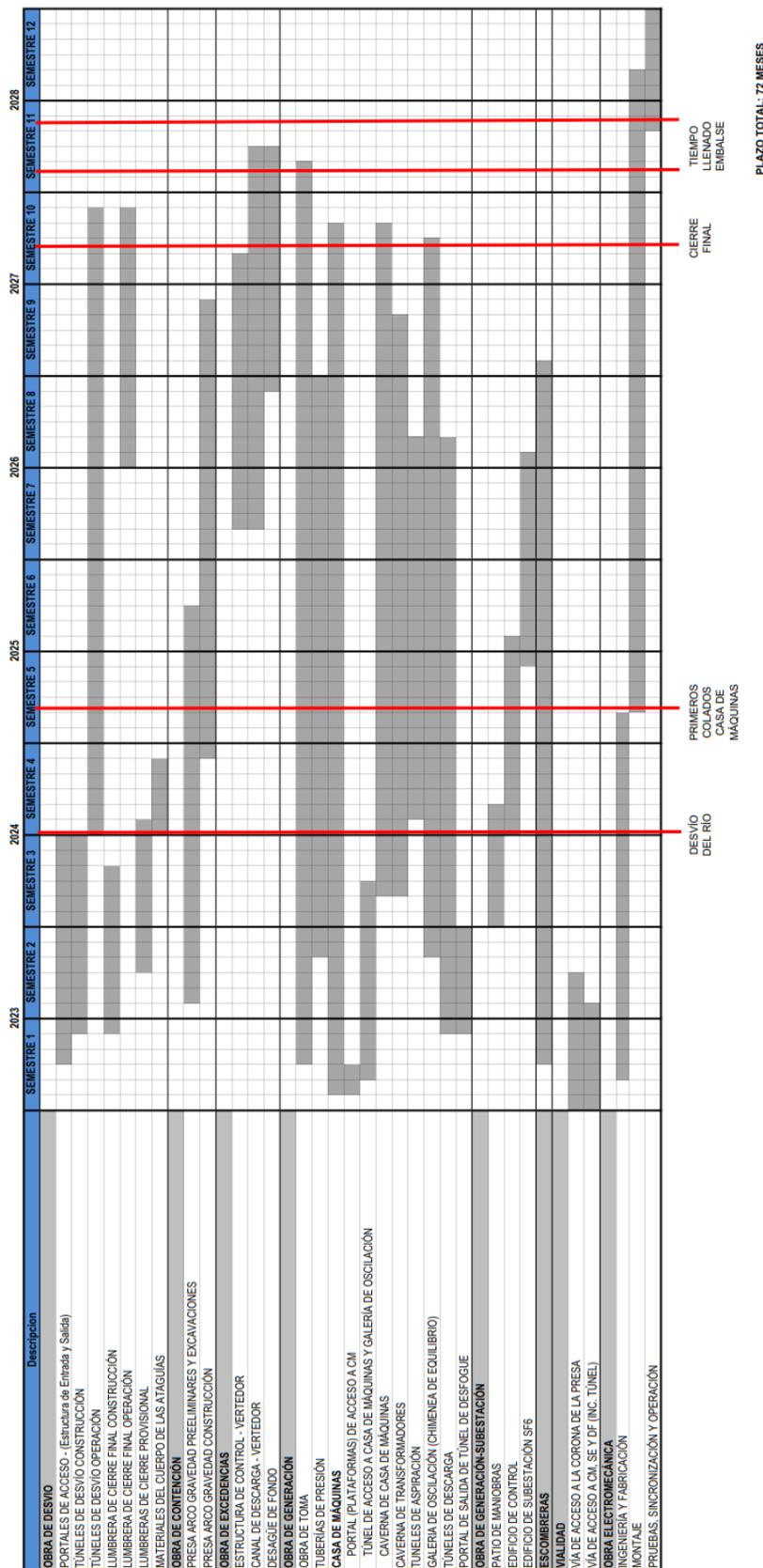


Figura 16: Programa de construcción resumido etapa 1

### 10.3 Presupuesto etapa 2

El importe total referencial estimado para la etapa 2 del aprovechamiento hidroeléctrico Santiago es de 597 080 557 millones de dólares, actualizado a enero 2021. Dicho presupuesto deberá actualizarse a la fecha en la cual vaya a ser construido, así como la correspondientes actualización del agregado ecuatoriano.

RESUMEN GENERAL DEL PRESUPUESTO PROYECTO PH SANTIAGO ETAPA 2 (MONTOS ACTUALIZADOS A ENERO 2021)				\$ 597.080.557	
LICITACIÓN PH SANTIAGO (Considera el 43,32% de Indirectos)				\$ 416.611.460	
1	Licitación modalidad Precios Unitarios			\$ 186.778.755	\$ 267.688.178
1.1	Obra Civil de Superestructuras			\$ 186.778.755	\$ 267.688.178
1.1.1	Obra de Generación - Obra de Toma y Tuberías de Presión	\$ 35.577.139	\$ 50.988.559		
1.1.2	Obra de Generación - Casa de Máquinas Subterráneas y Obras Anexas	\$ 47.443.706	\$ 67.995.523		
1.1.3	Túneles de Aspiración - Galerías	\$ 103.757.909	\$ 148.704.095		
2	Licitación modalidad: Costo Fijo			\$ 229.832.706	\$ 329.392.379
2.1	Equipamiento Electromecánico	\$ 229.832.706	\$ 329.392.379		

Valores incluido el costo directo  
Valores sin incluir el costo indirecto

**Tabla 8:** Presupuesto referencial del proyecto etapa 2

### 10.4 Programa de Obra etapa 2

Con base en la planeación estratégica, los procedimientos constructivos y los rendimientos planteados, se estableció la duración de las actividades que conforman el programa general de obra del proyecto en su etapa 2.

Las hipótesis de días y horas de trabajo, son las mismas que las utilizadas en la etapa 1.

El programa de obra plantado contiene el desglose de actividades para la obra electromecánica y su interacción con la obra civil, lo que da mayor certeza al tiempo para la puesta en marcha y operación de las unidades generadoras.

Se divide en 4 grandes grupos que contemplan lo siguiente, y tiene una duración total de **55 meses** para la puesta de operación de 4 unidades:

- Actividades previas y caminos de construcción.
- Obra de generación – Etapa 2
- Obra electromecánica
- Pruebas, sincronización y operación de unidades.

El camino crítico pasa por los montajes de los 4 nuevos grupos. En la **Figura 17** se presenta un resumen del cronograma.

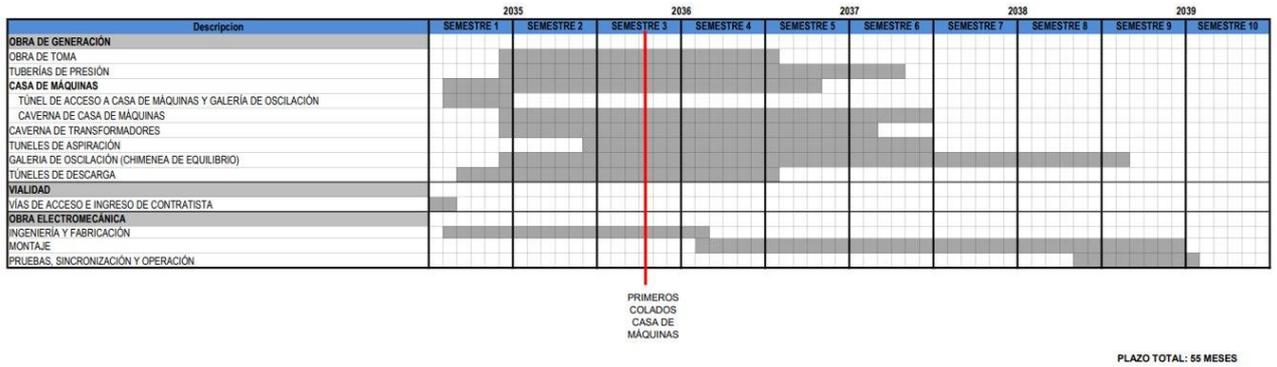


Figura 17: Programa de construcción resumido etapa 2

## 11. EVALUACIÓN ECONÓMICA-FINANCIERA

### 11.1 Evaluación económica-financiera etapa 1

La siguiente **Tabla 9** muestra los parámetros principales utilizados para efectuar el análisis económico y financiero.

Los parámetros principales se pueden dividir entre parámetros técnicos del proyecto, que provienen principalmente de las conclusiones presentadas en los otros capítulos de este informe y los parámetros económicos y financieros que fueron estimados en base a las condiciones de contorno del proyecto, como datos históricos, datos de entidades financieras y oficiales, etc.

<b>PARAMETROS ECONOMICOS</b>		
Tasa de descuento económica	[%]	8.54%
Inflación	[%]	2.0%
<b>PARAMETROS FINANCIEROS</b>		
Tasa de descuento capital propio	[%]	21.8%
Inflación	[%]	2.0%
Interés	[%]	8.5%
Periodo	[años]	20
Financiamiento	[% del coste]	70%
<b>PARAMETROS DEL PROYECTO</b>		
Capacidad instalada	[MW]	2408
Años de operación	[años]	50
<b>COSTES Y PLAZOS DEL PROYECTO</b>		
Tiempo de obra	[meses]	72
Tiempo de obra	[años]	6
Coste total Proyecto	[MM USD]	3053
Coste Maquinaria y Equipo	[%]	30%
Coste Obra Civil	[%]	59%
Coste Pre-operativo (excl. intereses)	[%]	11%
<b>DATOS DE PRODUCCIÓN NETA</b>		
Producción continua bruta	[GWh/año]	14 573
Producción continua neta	[GWh/año]	14 500
Factor de planta producción continua	[%]	67%
<b>PRECIO DE ENERGIA</b>		
Producción continua	[USD/MWh]	55
<b>GASTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</b>		
Gastos de operación y mantenimiento	[MM USD/año]	30.5
Gastos de agua	[USD/MWh]	0.20

**Tabla 9:** Parámetros principales del modelo económico-financiero

## 11.2 Resultados principales del análisis económico

Basado en los parámetros indicados arriba se calcularon los indicadores económicos y financieros más habituales para este tipo de proyecto. Los resultados de la evaluación económica están resumidos en la siguiente **Tabla 10**.

Indicador económico	Unidad	Resultado
Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto, sin impuestos	%	18.9
Valor Presente Neto del capital propio (VPN)	M USD	5 464
Relación Beneficio / Costo	-	3,01
Costo nivelado de energía (LCOE)	USD/MWh	18,28
Tiempo de recuperación del capital propio	Años	3,39

**Tabla 10:** Indicadores económicos del proyecto

Se puede observar que todos los indicadores económicos son positivos y que el proyecto puede ser considerado viable desde un punto de vista económico, representando un valor añadido para el país y sus ciudadanos.

### 11.3 Resultados principales análisis financiero

Para el análisis financiero se utilizaron los mismos indicadores que para el análisis económico, pero aplicándolos únicamente al capital propio y no al proyecto entero. Los resultados de este análisis se muestran en la **Tabla 11**.

Indicador financiero	Unidad	Resultado
Tasa Interna de Retorno (TIR) del capital propio	%	26.2
Valor Presente Neto del capital propio (VPN)	M USD	199
Relación Beneficio / Costo	-	1.16
Costo Nivelado de Energía (LCOE)	USD/MWh	44,70
Tiempo de recuperación del capital propio	Años	2.02

**Tabla 11:** Indicadores económicos del proyecto

También desde un punto de vista financiero el proyecto muestra ser viable y por lo tanto debería de ser interesante para potenciales inversores privados. A este respecto cabe mencionar que el análisis fue efectuado basado en una tasa de descuento teórica y que cada inversor hará su propio análisis de riesgos para definir su tasa requerida para así poder juzgar sobre su interés en invertir en el proyecto. Es por lo tanto primordial bajar en la medida de lo posible todos los riesgos asociados al proyecto, de manera a contar con el máximo interés posible de los inversores. Es justamente porqué esta tasa de descuento es sensiblemente más elevada que la tasa usada para la evaluación económica, que los indicadores financieros son menos favorables que los indicadores económicos.

### 11.4 Evaluación económico-financiera etapa 2

Cómo indicado en la introducción, en un primer paso se han utilizado los mismos parámetros financieros que en la Etapa 1, adaptando únicamente los parámetros técnicos del proyecto. En la **Tabla 12** se resumen los parámetros considerados.

Los precios indicados, tanto del proyecto como de la energía, se entienden cómo precios a inicio de operación de la Etapa 1. Considerando que la Etapa 2 entrará en operación después de la Etapa 1, a estos precios se les aplicará la inflación correspondiente para el análisis económico y financiero.

<b>PARÁMETROS ECONÓMICOS</b>		
Tasa de descuento económica	[%]	8.54%
Inflación	[%]	2.0%
<b>PARÁMETROS FINANCIEROS</b>		
Tasa de descuento capital propio	[%]	21.8%
Inflación	[%]	2.0%
Interés	[%]	8.5%
Periodo	[años]	20
Financiamiento	[% del coste]	70%
<b>PARÁMETROS DEL PROYECTO</b>		
Capacidad instalada	[MW]	1210
Años de operación*	[años]	50
<b>COSTES Y PLAZOS DEL PROYECTO</b>		
Tiempo de obra	[meses]	56
Tiempo de obra	[años]	5
Coste total Proyecto	[MM USD]	597
Coste Maquinaria y Equipo	[%]	55%
Coste Obra Civil	[%]	45%
Coste Pre-operativo (excl. intereses)	[%]	0%
<b>DATOS DE PRODUCCIÓN NETA</b>		
Producción continua bruta	[GWh/año]	581
Producción continua neta	[GWh/año]	578
Factor de planta producción continua	[%]	5%
<b>PRECIO DE ENERGÍA</b>		
Producción continua	[USD/MWh]	55
<b>GASTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</b>		
Gastos de operación y mantenimiento	[MM USD/año]	6
Gastos de agua	[USD/MWh]	0.20

**Tabla 12:** Parámetros principales considerados para el análisis de la Etapa 2.

### 11.5 Resultados principales Etapa 1 y Etapa 2 conjuntamente

Considerando los parámetros descritos anteriormente y usando el modelo económico-financiero elaborado para el proyecto Santiago se obtienen los resultados económicos y financieros resumidos

en la **Tabla 13** y la **Tabla 14** respectivamente para una entrada en servicios de la Etapa 2 10, 15 y 20 años después de la Etapa 1 respectivamente.

Indicadores económicos	Unidad	Resultados		
		10 años	15 años	20 años
Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto	%	18.5%	18.7%	18.8%
Valor Presente Neto del proyecto (VPN)	M USD	5352	5379	5399
Costo Nivelado de Energía (LCOE)	USD/MWh	19.76	19.37	19.08
Relación Beneficio / Costo	-	3.39	3.39	3.39
Tiempo de recuperación del capital propio	Años	2.78	2.84	2.88

**Tabla 13:** Indicadores económicos de la Etapa 2 considerando los parámetros de entrada de base.

Indicadores financieros	Unidad	Resultados		
		10 años	15 años	20 años
Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto	%	25.8%	26.0%	26.1%
Valor Presente Neto del proyecto (VPN)	M USD	179	191	196
Costo Nivelado de Energía (LCOE)	USD/MWh	45.81	45.16	44.89
Relación Beneficio / Costo	-	2.02	2.02	2.02
Tiempo de recuperación del capital propio	Años	1.14	1.16	1.16

**Tabla 14:** Indicadores financieros de la Etapa 2 considerando los parámetros de entrada de base.

Se puede observar que para todos estos escenarios las rentabilidades, tanto económicos como financieros son correctas. Sin embargo, los indicadores también muestran que al añadir la Etapa 1 la rentabilidad tiene una leve baja con respecto a la Etapa 1 sola (TIR económica 18.9%, TIR financiera 26.2%). Cuanto más tarde se construye la Etapa 2, menos influye su construcción sobre los resultados financieros, y tiende a los resultados de la etapa 1 sola.

### 11.6 Escenarios alternativos para la viabilidad de la Etapa 2.

A la vista de los resultados económicos y financieros de la Etapa 2, se han analizado escenarios alternativos que permitirían garantizar una viabilidad económica-financiera de la etapa 2. Al ser el criterio financiero más exigente que el criterio económico (la tasa de descuento del capital propio es muy superior a la tasa de descuento económico), el análisis se ha concentrado en este criterio.

Cómo fuera indicado en la introducción, para este análisis se han considerado tres escenarios:

- a) Aumento del precio de electricidad;
- b) Introducción de un precio más elevado para las horas de pico (manteniendo el precio de base igual que el precio de energía considerado para el caso sin horas pico);
- c) Introducción de un pago por potencia.

Para estos tres casos, se buscaron los parámetros que permiten llegar a la viabilidad financiera, ósea que el valor presente neto sea igual a 0, lo que equivale a que la relación Beneficios Costes sea igual a 1 o que la tasa interna de rentabilidad sea igual a la tasa de descuento del capital propio.

Escenario:	Aumento precio pico	Pago por potencia
Precio de energía base (USD/MWh)	55	55
Precio energía pico (USD/MWh)	96	55
Precio de potencia (USD/MW instalado/año)	0	24 199

**Tabla 15:** Precio de energía para viabilidad económica Etapa 2.

Escenario:	Aumento precio pico	Pago por potencia
Precio de energía base (USD/MWh)	55	55
Precio energía pico (USD/MWh)	162	55
Precio de potencia (USD/MW instalado/año)	0	70 290

**Tabla 16:** Precio de energía para viabilidad financiera Etapa 2.

Se puede observar que la viabilidad económica es más fácil de alcanzar que la viabilidad financiera, ya que requiere un precio de la energía de pico un 75% por encima del precio de base considerado para el estudio. Según la evolución del parque eléctrico y de la demanda en el país, no se puede excluir que se llegue a este tipo de precios. Con el cambio de la matriz de producción eléctrica a más renovables no regulables, este tipo de aumento es posible, cómo ya se puede observar en la actualidad en Europa.

Para un pago por pura potencia instalada, lo que equivaldría a una subvención directa del parque de producción, dicha retribución debería de ser de 24 199 USD/MWh para la rentabilidad económica, lo que equivale a unos pagos directos por potencia instalada de 364 millones de USD por año. Es poco probable que dicha suma pueda ser acordada para una subvención directa de la segunda etapa del proyecto Santiago.

## 12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente proyecto definitivo Santiago se ha desarrollado para que su obra de generación pueda ser construida en dos etapas, una primera etapa con 8 grupos de potencia generada aproximada de 2 400 MW y una segunda, con 4 grupos de 1 200 MW.

Las obras de contención, excedencia y desagües de fondo se integran todas en el cuerpo mismo de la presa y forman parte de las obras civiles a construir por precios unitarios.

Las obras de desvío se proyectaron en la margen derecha, a construir por modalidad contractual de precio fijo.

Las obras electromecánicas también han sido planteadas con una modalidad de contrato por precio fijo.

Las obras de generación de la primera etapa prevén en sus documentos las obras necesarias a dejar materializadas para proceder a la construcción de la segunda etapa, minimizando la interferencia con la operación en marcha.

Los estudios y análisis realizados por Lombardi en la fase 1 (Ref. [4] y [5]) determinaron la capacidad máxima por cada grupo en relación con el requerimiento del Plan Maestro de Electricidad 2018-2027 (Ref. [1]), limitaciones del sistema nacional integrado de transporte eléctrico, y al requerimiento de caudal ecológico del río.

*Los análisis financieros muestran valores muy atractivos para inversores privados, con un costo nivelado de energía por debajo del costo promedio mundial, lo cual deja margen para desarrollar un sistema de concesión privado con diferentes opciones de plazos de concesión, precio de energía, que pueden llevar a un acuerdo beneficioso para CELEC, el estado de Ecuador, y el potencial concesionario privado. La etapa 1 sola tiene un atractivo económico superior a la etapa 1 + 2 para un inversor privado, sin embargo, la etapa 2 tiene un potencial estratégico para el Ecuador, como reserva de potencia y oportunidades futuras de exportación a un costo unitario muy bajo.*

### 12.1 Principales optimizaciones y rediseños

Como principales trabajos de rediseños realizados para construir la obra de generación en etapas, se puede destacar:

1. relocalización de la casa de máquina, básicamente a través de una rotación del eje de esta, que se visualizó factible en acuerdo a la investigación geológica disponible. Esta relocalización permite alcanzar una serie de ventajas, entre las cuales se encuentra la reducción de la longitud de las galerías de conducción en presión y el hecho de tener una caída lo más uniforme posible entre las unidades, y evitar de colocar chimenea de equilibrio en las aducciones de mayor recorrido;
2. relocalización de la Caverna de los Transformadores aguas abajo de la Casa de Maquinas. Esta modificación permitió reducir el blindaje de las tuberías de presión y disponer de un recubrimiento

- de roca más adecuado para el sostenimiento de la obra subterránea por debajo del fondo de la caverna misma;
3. a partir de las visitas a campo, se ha actualizado el plano de planta geológica, mejorando la caracterización en la zona del canal de desfogue y se ha reclasificado la falla IV como lineamiento;
  4. en la Caverna de los Transformadores, para cada GSU se modifica la utilización de 3 transformadores monofásicos de potencia máxima 250 MVA por 1 transformador trifásico de potencia máxima 380 MVA, reduciendo así la necesidad de materiales eléctricos y de conexión, así como optimizando la dimensión de la caverna de transformadores;
  5. en los túneles de desfogue se ha realizado una importante mejora al colocar compuertas aguas arriba y aguas abajo de los mismos, dentro de la galería de oscilación y en el canal de desfogue respectivamente, de modo tal que cada uno de ellos pueda ser aislado y vaciado, con una afectación mínima a la operación de la central.
  6. se ha mejorado la zona de transición de los túneles de aducción hasta la conexión con la cámara espiral;
  7. se aumentó el largo de la casa de máquinas hacia al sur, para agregar espacio de mantenimiento;
  8. se incorporó, dentro de la casa de máquinas, un sector de talleres y bodegas, así como un espacio para oficinas, salas de reuniones, baños, vestuarios, comedor y espacio para vehículos;
  9. se ha modificado el layout de la subestación, reubicando y modificando distancias para el TSP, la planta diésel, tanque contra incendio, entre otros servicios;
  10. se ha modificado la topología de los equipos eléctricos en la subestación GIS, de modo tal que se ha logrado mantener las dimensiones del edificio, a pesar de que se tiene mayor cantidad de grupos;
  11. se realizó un fuerte rediseño del sistema de enfriamiento, atendiendo las experiencias del personal técnico de CELEC. Se modificó el punto de extracción de agua, se mejoró el sistema de filtrado, se incorporaron bombas que minimizan la intervención de mantenimiento;
  12. se mejoró el sistema de inyección de aire, agregando un sistema de enfriamiento y especificaciones tendientes a controlar la humedad y temperatura dentro de la casa de máquinas y transformadores, así como la gestión de seguridad y humos;
  13. se mejoró la gestión de seguridad y extracción humos, colocando una grada con puertas cortafuegos y sistema de presurización, así como se describió la lógica de acción frente a diversos escenarios de incendio;
  14. se desarrolló un sistema de túneles constructivos para la primera y segunda etapa de la obra, posibilitando que las cavernas de la segunda etapa se construyan sin afectación de la primera. Se previeron los correspondientes pantalones de hormigón para proceder a la construcción de los túneles constructivos de segunda etapa;

15. se previó una combinación de túneles constructivos y especificaciones de la obra de toma de la segunda etapa, que en conjunto posibilitan la construcción de las tuberías de presión de la etapa 2 minimizando la afectación a la operación de la generación;
16. se ajustaron los caminos constructivos para posibilitar excavar la obra de toma de las etapas 1 y 2 al mismo tiempo;
17. se estudió a nivel preliminar la orientación de salida de las líneas de alta tensión, de modo tal de minimizar su recorrido en función de las subestaciones de llegada preliminarmente indicadas;
18. se rediseñó el talud margen izquierdo, unificando las bermas y pendientes de la obra de toma con la presa, por sobre nivel 455,00 msnm. Con esta modificación, se evitó que la llegada al coronamiento de la presa, tanto para mantenimiento de las compuertas del vertedero como para diferentes necesidades operativas, sea atravesando un túnel y puente curvo. El actual diseño prevé un acceso libre por la explanada de la obra de toma, con un espacio para estacionamiento, maniobras y acopio;
19. se pasó a costo fijo la obra de desvío;

## 13. REFERENCIAS

### 13.1 Estudios

- [1] Plan Maestro de Electricidad 2018-2027 vigente al 2020 Plan Maestro de Electricidad 2018 – 2027 - Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables; 2020.
- [2] Análisis del Impacto de la Salida de una Unidad de la Central Santiago en el Sistema Nacional Interconectado – CENACE, junio del 2018.
- [3] Estadísticas Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2019 (Documento preliminar) – ARCONEL, mayo 2019.
- [4] FASE 1 - Prefactibilidad construcción por etapas – Doc. 2018.0717.002-I-002 - Estudio Hidroenergético – Lombardi, enero 2021.
- [5] FASE 1 - Prefactibilidad construcción por etapas – Doc. 2018.0717.002-I-003 - Informe Conceptual de expertos – Lombardi, enero 2021.

### 13.2 Artículos y libros

- [6] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, NEC - Norma Ecuatoriana de la Construcción, Quito, 2015.