

Excavación de túneles en ambientes volcánicos y paleovaguadas: Proyecto hidroeléctrico Quijos (Ecuador)

Tunneling in volcanic environments and paleovalleys: Quijos hydroelectric Project (Ecuador)

Juan Luis Faus Asensio*

Palabras clave

ambiente volcánico;
paleovaguada;
paleocauce; paleoladeras;
materiales aluviales antiguos;
complejo vulcano-sedimentario;

Sumario

El Proyecto Hidroeléctrico Quijos, fue planteado inicialmente como un esquema escandinavo de “alta presión” excavado con tuneladora (TBM) bajo el basamento metamórfico. En la fase inicial, fue aceptada la propuesta de la adjudicataria de realizar la excavación convencional y subir la rasante de los túneles. A medida que avanzaban las excavaciones se evidenció la existencia de “paleovaguadas” de grandes proporciones, rellenas de materiales aluviales antiguos. Todos los frentes de excavación interceptaron dichas paleovaguadas y colapsaron o se tuvieron que paralizar. Se realizó una investigación geológica complementaria y una nueva interpretación del modelo geológico para buscar un trazado alternativo que viabilizará de nuevo la excavación de los túneles.

Keywords

volcanic environment;
paleovalleys;
paleobed;
paleoslope;
ancient alluvial materials;
volcanic-sedimentary formation;

Abstract

The Quijos Hydroelectric Project was, initially, proposed as a Scandinavian pattern of “high pressure” excavated with tunnel boring machine (TBM) under the metamorphic basement. At the initial stage, it was accepted the proposal of the contractor to perform the conventional excavation with drilling and blasting and go up to slope of the tunnel. As the excavation of the tunnel progressed it confirmed the existence of “paleovalleys” of major proportions, filled with ancient alluvial materials. All excavation faces intercepted these paleocauces and caused the collapse or had to be paralyzed. We carried out a complementary geological investigation and a new interpretation of the geological model in order to find an alternative alignment which it viable tunnels excavation.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y DATOS DE PARTIDA

El Gobierno del Ecuador, a través de Empresa Pública **Corporación Eléctrica de Ecuador (CELEC-EP)** está impulsando en la actualidad la construcción de siete (7) proyectos hidroeléctricos (figura 1), entre los que se encuentra el Proyecto Hidroeléctrico Quijos. Dicho Proyecto está ubicado en el “Oriente” ecuatoriano, a 80 km al este de la ciudad de Quito y a 17 km de la localidad de Papallacta, en las estribaciones orientales de la Cordillera Real de los Andes. La zona del emplazamiento corresponde con la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Quijos, en un sector que administrativamente pertenece a la Provincia de Napo.

La propiedad del proyecto está representada por CELEC-EP, siendo su unidad de negocio **CELEC-ENERNORTE** la que supervisa las obras y realizará posteriormente la explotación. CELEC-EP puso a cargo del diseño de licitación y de las actividades de fiscalización (Dirección Facultativa de la Obra) a la **Asociación Astec-Integral** mientras que la construcción está a cargo de la empresa **China National Electric Engineering Co. (CNEEC)**.

Para hacer frente a las dificultades técnicas encontradas en las excavaciones subterráneas, CELEC-ENERNORTE

solicitó al **consorcio ITH** formado por las empresas **Inclam, TYPESA y Hospiplan**, la prestación de los servicios de asesoría técnica para supervisar dichas obras subterráneas. El alcance de los trabajos incluía además establecer una nueva metodología de excavación y supervisión geotécnica, así como coordinar la implementación de las medidas correctoras a adoptar para poder superar las dificultades técnicas.



Figura 1. Proyectos hidroeléctricos en ejecución en Ecuador.

* Corresponding author: jfaus@typsa.es

Departamento de Geotecnia. TYPESA, Madrid, España.

La central hidroeléctrica se diseñó con una potencia nominal de 50 Mw por medio de tres turbinas de 17 Mw de tipo Francis, con una energía anual generada de 267,91 GWh. La Casa de Máquinas era de tipo exterior y se ubicaba en la proximidad de la confluencia de los ríos Papallacta y Quijos, a la cota de 2.040 msnm, siendo el caudal de diseño de 22 m³/s y el salto neto de 272 m.

El sistema de captación se componía de dos obras de toma formadas por sendos azudes con sus respectivas tomas laterales y desarenadores. Una de las tomas se ubicaba en el río Papallacta cerca de la población de Cuyuja y la otra en el río Quijos, ambas a una elevación de 2.320 m.

Datos de partida

En el diseño de Licitación (Estudio Factibilidad año 2000), se preveía un esquema escandinavo de “alta presión”, es decir, sin cambio de pendiente entre el sistema de conducción y el túnel de presión. Este esquema en forma de “Y” estaba constituido por 2 obras de captaciones con sendos pozos de carga de entre 150 y 240 m de profundidad respectivamente, 2 túneles de carga denominados Túnel Papallacta y Túnel Quijos, de alrededor 2.500 m de longitud y de 3,5 m de diámetro de excavación, que se unían en un Túnel Principal de 3.300 m de 3,8 m de diámetro hasta la chimenea de equilibrio y finalmente con el Túnel de Presión de 1.220 m y 3,8 m de diámetro hasta la Casa de Máquinas. Los túneles estaban diseñados entre las cotas de 2.170 m y 2.000 m con pendiente de 2% (figura 2).

Se adoptaba una excavación por medio de tuneladora TBM tipo escudo de 3,8 m de diámetro. Se proponía iniciar la excavación desde aguas abajo, en la Casa de Máquinas, terminando en los pozos de carga en las tomas, por donde se recuperaba la tuneladora.

El modelo geológico-geotécnico, en esta situación, con un esquema profundo, preveía atravesar todos los túneles que formaban las conducciones por el interior del

basamento metamórfico (Unidad-6 constituida por esquistos cuarzo-sericíticos con alguna intercalación de esquistos grafitosos). En la parte superior, sobre el basamento, aparecía la Unidad 2 formada por lavas masivas y vesiculares y sobre éstas, la Unidad 1 con lavas masivas con intercalaciones de escorias y lavas vesiculares. En el contacto entre el basamento metamórfico y el volcánico, ya se intuía la presencia de materiales aluviales antiguos, (Unidad 5 aluviales y lahares), pero en cualquier caso sin la envergadura con la que se interceptaron con las excavaciones de los túneles.

Una vez adjudicada la obra, durante las negociaciones previas al inicio de la construcción (**Acta de Negociación**), la empresa adjudicataria CNEEC propuso excavar todos los túneles con técnica convencional (perforación y voladura) con una sección en “baúl” de 3,75 m de ancho, al no disponer de los equipos y técnica para realizar la excavación con máquinas integrales tipo TBM. Al ser túneles de pequeña sección, se realizaba la excavación a sección completa con perforación manual mediante martillos neumáticos con pies de avance. La longitud total de las obras subterráneas contando los túneles y las ventanas de acceso superaba los 10.500 m. Esta propuesta fue aceptada por la CELEC.

Se mantenía el trazado en planimetría y se modificaba la altimetría de los túneles, suprimiendo los pozos de carga y elevando las entradas de los túneles a la cota de las obras de toma (2.320 msnm). Se propuso ejecutar una pendiente longitudinal de la conducción prácticamente constante del 3,4 % hasta la Casa de Máquinas (2.041 msnm). Además, la chimenea de equilibrio fue trasladada 500 m al este de la anterior. El cambio de sistema de excavación requirió la realización de 3 ventanas intermedias de acceso (Ventanas 1, 2 y 3) para disponer de más frentes de trabajo.

En la figura (figura 3) se puede ver un corte geológico esquemático del túnel de Papallacta, donde se muestra la comparativa entre el diseño de licitación (Estudio de Factibilidad. Año 2000) y el nuevo trazado aprobado, más superficial y muy próximo al contacto entre litologías.

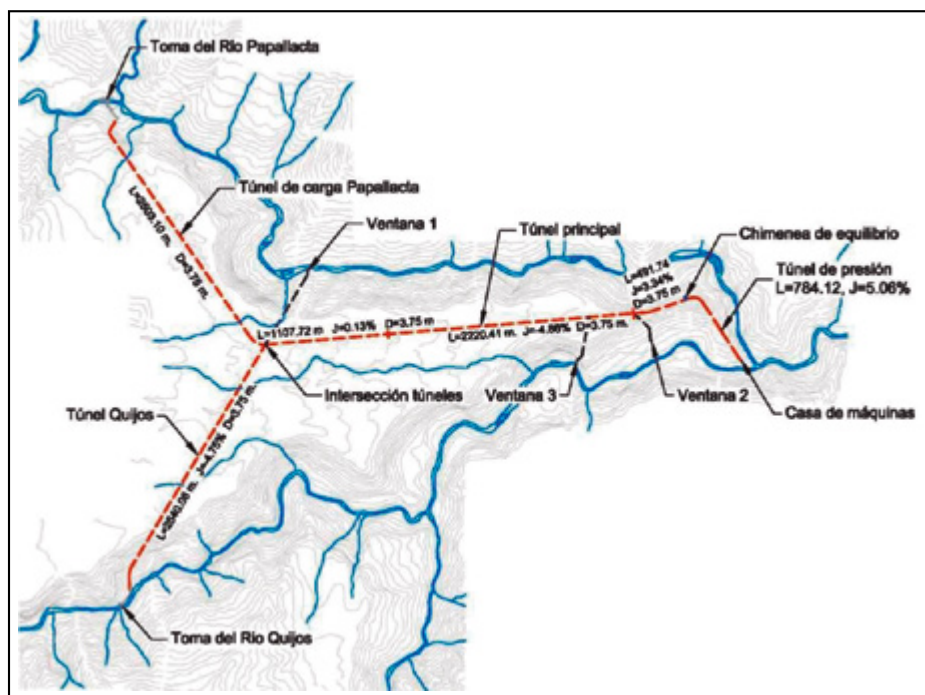


Figura 2. Esquema de conducciones del diseño de Licitación. (Estudio de Factibilidad año 2000).

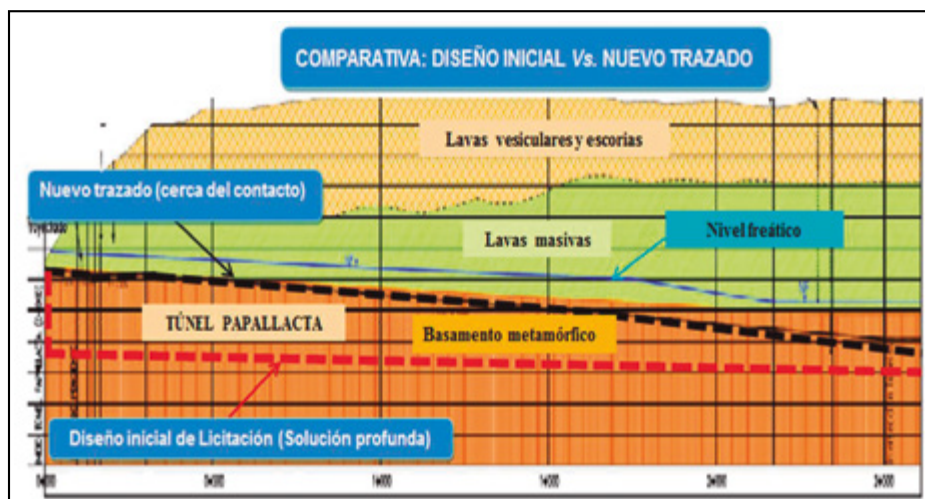


Figura 3. Corte geológico esquemático del túnel Papallacta (Comparativa entre el diseño inicial y el nuevo trazado aprobado).

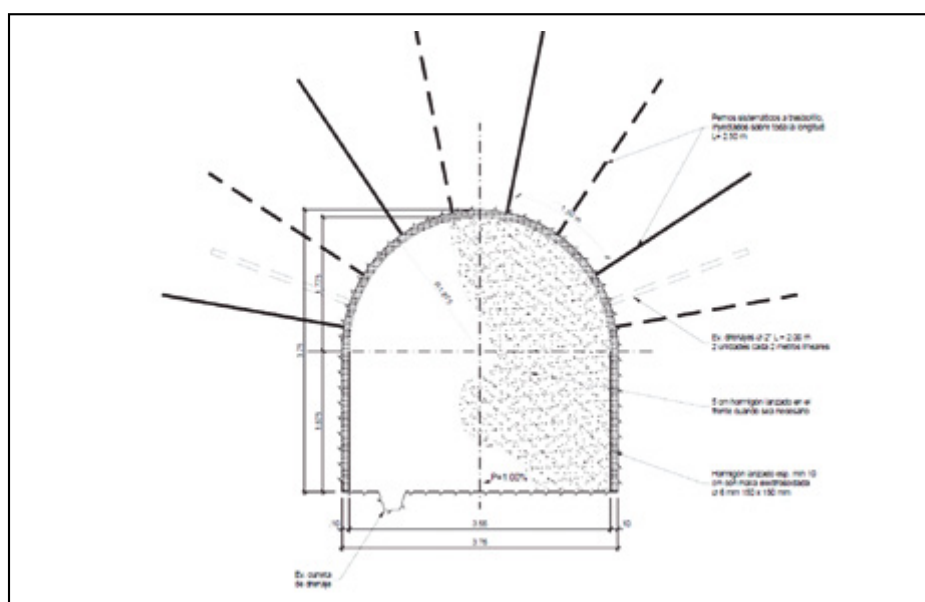


Figura 4. Sección tipo en "baúl" de 3,75 m de ancho. Ejemplo de sostenimiento para roca clase III ($1 < Q < 10$ y $40 < RMR < 60$)

En la (figura 4) se muestra una sección transversal del nuevo diseño de los túneles.

Para justificar esta propuesta de cambio de la altimetría, la compañía adjudicataria CNEEC realizó una campaña de investigación geofísica mediante la técnica AMT (Audio Magneto Telúrica), con el objeto de analizar el contacto entre el basamento metamórfico y el material volcánico. Se realizaron más de 7.000 m de perfiles de geofísica, con tomas de datos cada 200 m mediante electrodos porosos (figura 5). Se determinó, que el cambio altimétrico mantenía la excavación de los túneles por el interior del basamento metamórfico, aunque muy próximo al contacto entre litologías.

Singularidades del emplazamiento

El emplazamiento del Proyecto Hidroeléctrico Quijos es muy singular desde el punto de vista orográfico y geomorfológico, así como desde el propio ambiente geológico.

El proyecto se localiza en una zona de orografía compleja, (figura 6), se ubica entre el actual valle del río Quijos

y el río Papallacta en una meseta denominada localmente "Meseta de Huila" a una altitud de 2.550 msnm. Su morfología es caracterizada principalmente por la presencia de las formas erosivas de los ríos Papallacta y Quijos que fluyen hacia el Este y han excavado profundamente sus respectivos valles (más de 300 m), generando paredes muy inclinadas (hasta 65-70° de inclinación, a veces verticales) y escarpes abruptos que bordean la meseta.

Desde el punto de vista geológico, indicar que el emplazamiento está fuertemente influenciado por la cercanía al Volcán Antisana con una altitud de 5.704 msnm (imagen 2) y a una distancia aproximada al proyecto de 10 km. Dicho volcán, ha sido el verdadero protagonista de la historia geológica del emplazamiento en los últimos 100.000 años, con su última gran erupción en el año 1800. Este volcán fue el responsable directo de la formación del complejo modelo volcano-sedimentario del emplazamiento del proyecto, y que se ha ido evidenciando a medida que avanzaban las excavaciones. Este ambiente volcánico, con diferentes flujos de lava (andesitas, basaltos, escorias y cenizas) sobre un sustrato o basamento metamórfico, ha sido uno de los

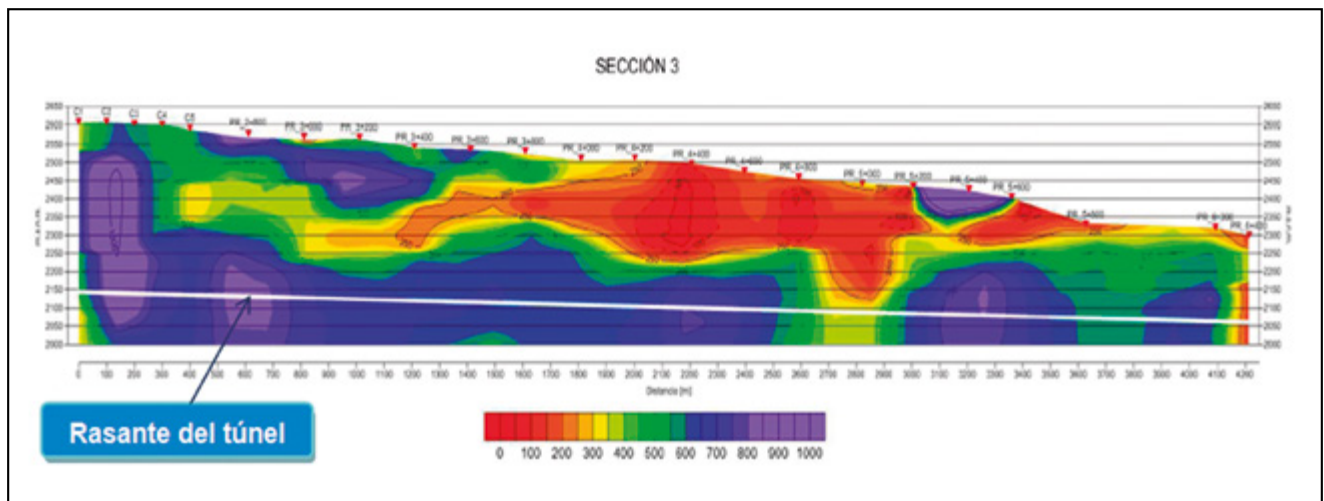


Figura 5. Perfil de la investigación geofísica mediante técnica AMT (Audio Magneto Telúrica).

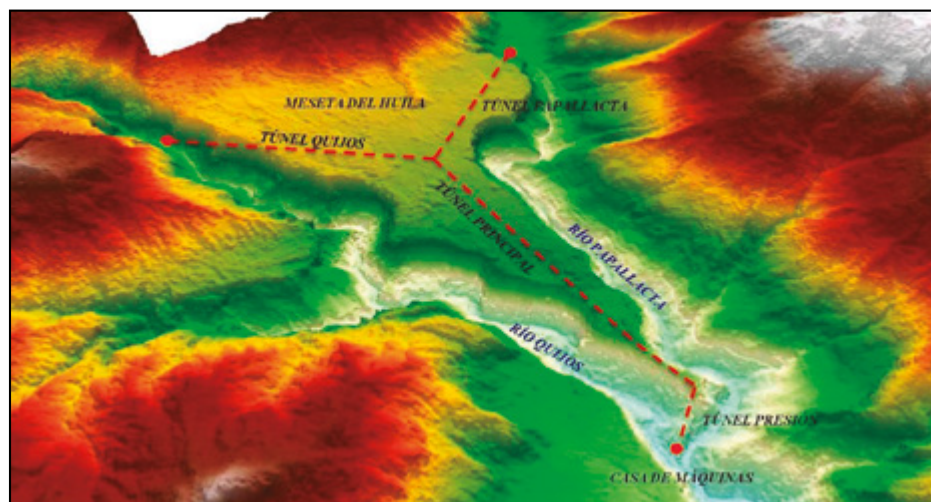


Figura 6. Modelo de pendientes y orografía del emplazamiento del proyecto (GeoRisk).



Imagen 1. Vial de acceso a la toma Quijos (Pendiente máx. 21%).



Imagen 2. Emplazamiento del proyecto con la presencia del Volcán Antisana al fondo.

Tabla 1. Resumen de las incidencias ocurridas durante la excavación

Túnel	Longitud total (m)	Longitud excavada (m)	Litología prevista	Tipo de incidencia	Consecuencias
Túnel Papallacta	2.502	485	Lava columnar / Basaltos	Se interceptó depósitos sueltos de limos y arenas de origen lacustres	Colapso del frente y paralización de la excavación
Túnel de presión	784	784	Esquistos Cuarzo-sericíticos	Sin incidencias. Se excavó todo el túnel en roca metamórfica.	Sin problemas reseñables de estabilidad
Ventana-1	727	685	Esquistos Cuarzo-sericíticos	Se Interceptaron depósitos aluviales antiguos, con elevada carga hidráulica	Colapso del frente con fuerte descarga hidráulica (400 l/s)
Ventana-2	425	200	Lava columnar y escorias	Se Interceptaron depósitos aluviales, lahares, y material de derrumbes pre-volcánicos	Colapso del frente con fuerte retroceso del frente de más de 20 m
Ventana-3	408	226	Aluvial, lavas, escorias	Intercepto depósitos aluviales y conglomerados, con carga hidráulica	Paralización de la excavación

causantes de las dificultades encontradas durante la excavación de los túneles y obras subterráneas, tal y como se describe en el siguiente apartado.

2. DIFICULTADES ENCONTRADAS DURANTE LA EXCAVACIÓN DE LOS TÚNELES

Descripción de la problemática

El proyecto Quijos atravesó una situación muy compleja, que incluso hizo pensar a la promotora CELEC-EP en abandonar el proyecto. Las dificultades se deben principalmente a condiciones geológicas e hidrogeológicas difíciles encontradas durante la excavación de los túneles del sistema de conducción y de las ventanas de acceso. A esto, hay que añadir que la empresa adjudicataria utiliza una metodología de ejecución de los túneles deficiente y no dispone de equipos adecuados para afrontar con éxito estas condiciones de excavación.

Como se ha visto en la descripción inicial, el proyecto se localiza en una zona de orografía compleja y que la geología está fuertemente influenciada por la cercanía al Volcán Antisana, con diferentes flujos de lava (andesitas, basaltos, escorias y cenizas) sobre un sustrato o basamento metamórfico (esquistos cuarcíticos, sericíticos e intercalaciones de esquistos grafitosos). En el contacto entre dichas formaciones se había previsto la existencia de algunos depósitos aluviales antiguos, aunque en ningún caso con la envergadura de la gran paleovaguada que se interceptó por varios de los frentes de excavación.

Todo ello, confiere al proyecto una elevada complejidad desde el punto de vista geotécnico, que ocasionó varios colapsos y paralizaciones de la excavación.

Incidencias ocurridas durante la excavación

Se resume en la tabla 1 las incidencias ocurridas durante la primera fase de excavación de los túneles.

A continuación se describen con mayor detalle las incidencias indicadas:

Túnel Papallacta

En el frente del túnel Papallacta se habían excavado 471 m del total de 2.497,68 m. La excavación se realizó hasta esta abscisa en lavas columnares masivas y basaltos de buena calidad (roca de Clase II con valores de $Q > 10$) pero entre las abscisas 0+449 a la 0+460, se observó una zona de transición entre las lavas basálticas y depósitos aluviales prevolcánicos que en sus primeros metros afloraban en el hastial izquierdo en sentido de la excavación. Unos metros más adelante, en la abscisa 0+485 se interceptaron unos depósitos lacustres sueltos, constituidos por alternancias de niveles de limo y arenas finas que provocaron el colapso del frente de excavación (imágenes 3 y 4).

Túnel Ventana 1

Se estaba excavando todo el túnel en roca metamórfica sana formada por esquistos de composición petrográfica variable entre cloríticos, sericíticos, y esquistos de cuarzo buena calidad. En la abscisa 0+630, de forma súbita, se interceptó una paleovaguada con materiales aluviales. Estos depósitos aluviales antiguos estaban formados por bloques y gravas en matriz de arenosa de suelta a

poco cementada. Se avanzó en estos materiales sueltos con gran dificultad, hasta que en la abscisa 0+685 se produjo un desprendimiento en el frente con gran cantidad de material pétreo con bloques de hasta 50 cm de diámetro, ocasionando una cavidad o campana de más de 8 m de altura sobre la bóveda del túnel. Seguido al colapso, se produjo una fuerte descarga hidráulica liberada con fuerte presión (inicialmente más de 400 l/s y después se han mantenido constante con caudales de 250 l/s) (imágenes 5 y 6).

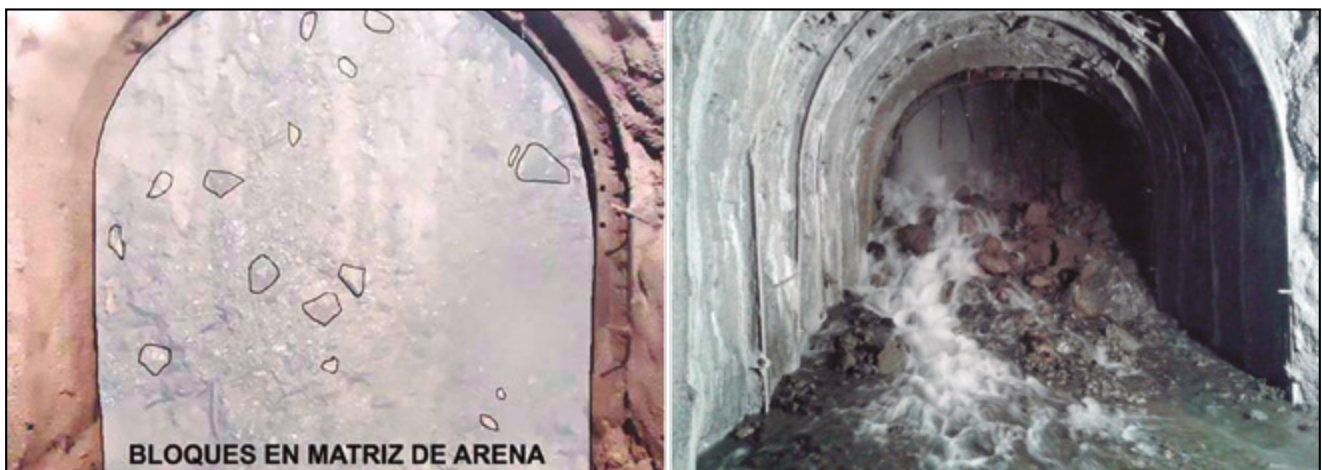
Túnel Ventana 2

La excavación de la ventana 2 se realizó en su totalidad en condiciones geológicas difíciles, ya que el eje de la ventana se desarrollaba en forma paralela a un sistema de alineamientos estructurales en dirección N-S. Durante el avance hasta la abscisa 0+200 se encontraron depósitos aluviales y de lahares constituidos por arena y gravas, depósitos arcillosos con bloques de esquistos cuarcíticos, posiblemente de origen coluvial y de derrumbe. Estos depósitos prevolcánicos produjeron varias cavernas y desprendimientos de bloques hasta que finalmente la fiscalización paralizó la excavación por falta de seguridad.

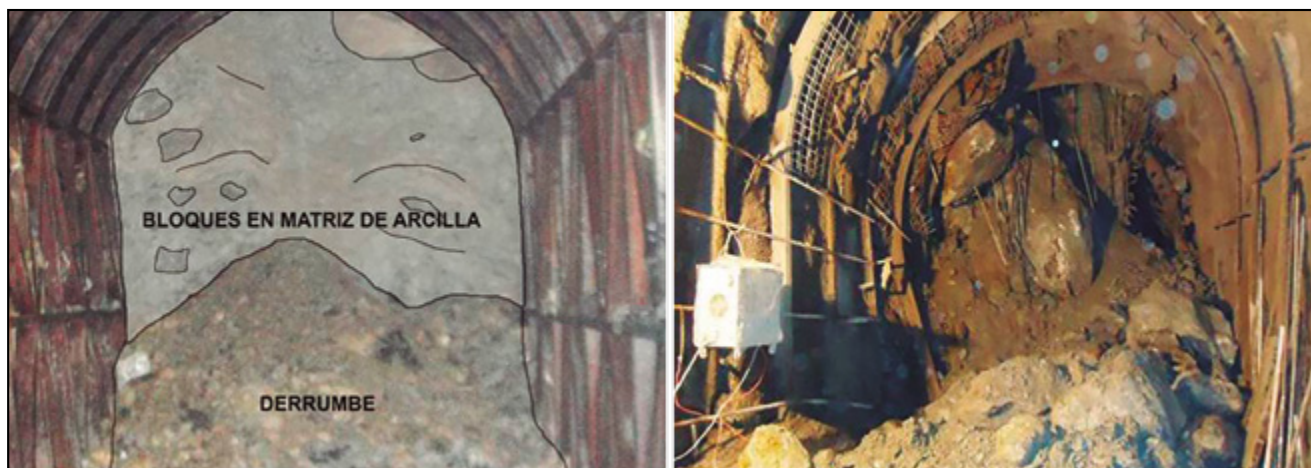
Poco después de la paralización, el túnel colapsó en la abscisa 0+200 con la formación de una gran chimenea y retroceso del frente de más de 20 m. En las siguientes



Imágenes 3 y 4. Transición del volcánico a los depósitos aluviales y colapso del túnel Papallacta en la abscisa 0+485 (Cortesía de Astec).



Imágenes 5 y 6. Ventana 1. Transición del metamórfico al aluvial y colapso en la abscisa 0+685 con fuerte descarga hidráulica de más de 400 l/s (Cortesía de Astec)



Imágenes 7 y 8. Ventana 2. Colapso en la abscisa 0+200 con gran retroceso del frente y elevada deformación del sostenimiento provisional. (Cortesía de Astec).



Imágenes 9 y 10. Ventana 3. Se interceptaron sedimentos del paleocauce en la abs. 0+219 m, con un elevado flujo de agua. Se paralizó la excavación en la abscisa 0+226. (Cortesía de Astec).

imágenes se aprecia la deformación tan importante del sostenimiento de los hastiales (imágenes 7 y 8).

Túnel Ventana 3

La excavación se realizó en rocas volcánicas, atravesando una litología conformada por escorias volcánicas y lavas masivas de color gris oscuro con textura porfirítica, y con intercalaciones de paquetes con depósitos aluviales y coluviales con fragmentos de lavas porfiríticas color gris azulado de hasta 30 cm de diámetro.

Entre las abscisas 0+202 y la 0+224, se encontró una zona clara de transición entre los materiales volcánicos y unos depósitos aluviales propios de una paleovaguada, constituidos por conglomerados poligenicos con soporte de matriz arenosa y elevado flujo de agua.

Para poder determinar el alcance de la paleovaguada, se ejecutó el sondeo horizontal exploratorio SV3-1 de 180 m, determinándose la paralización de las excavaciones (imágenes 9 y 10).

Posibles causas de las dificultades en la ejecución

A esta complejidad inherente a la singularidad del emplazamiento de la obra ya descrita, hay que añadir una serie de causas que, bajo nuestro punto de vista, han agravado la situación hasta

el punto de tener que paralizar temporalmente las excavaciones subterráneas y abandonar más de 1.100 m de túneles ya excavados. Estas causas las podemos enumerar de la siguiente forma:

- a) Investigaciones geológico-geotécnicas en fase de licitación insuficientes.

En fase de licitación se disponía de una información sobre la geología y geotecnia del ámbito del proyecto abundante, no obstante en la zona de túneles y obras subterráneas fue muy limitada. Durante la fase previa de investigación sólo se habían realizado 4 sondeos en la zona de los túneles. La longitud total de perforación de estos sondeos fue de 989 m para un total de más 10.000 m de túneles, es decir un ratio $m_{\text{sondeo}}/m_{\text{túnel}}$ de 0,1 muy por debajo de lo habitual (entre 0,7 y 1).

En estos sondeos, había evidencias de la existencia de materiales aluviales y lacustres de origen pre-volcánico entre el contacto volcánico y el metamórfico, pero en todos los casos de reducida potencia, muy lejos de la envergadura de la gran paleovaguada que se fue evidenciando a medida que avanzaban las excavaciones (imágenes 9 y 10).

- b) Cambios en los diseños de licitación

Tal y como se ha indicado en los datos de partida, en los diseños de licitación los túneles se planteaban con una

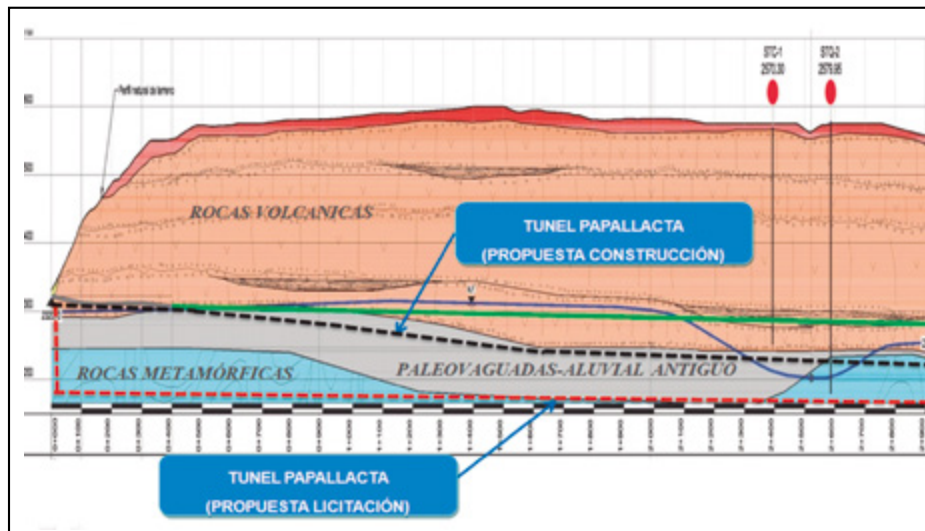


Figura 7. Perfil geológico del túnel Papallacta. Interpretación de Georisk sobre la “realidad” encontrada durante la excavación (Lombardi-Georisk).

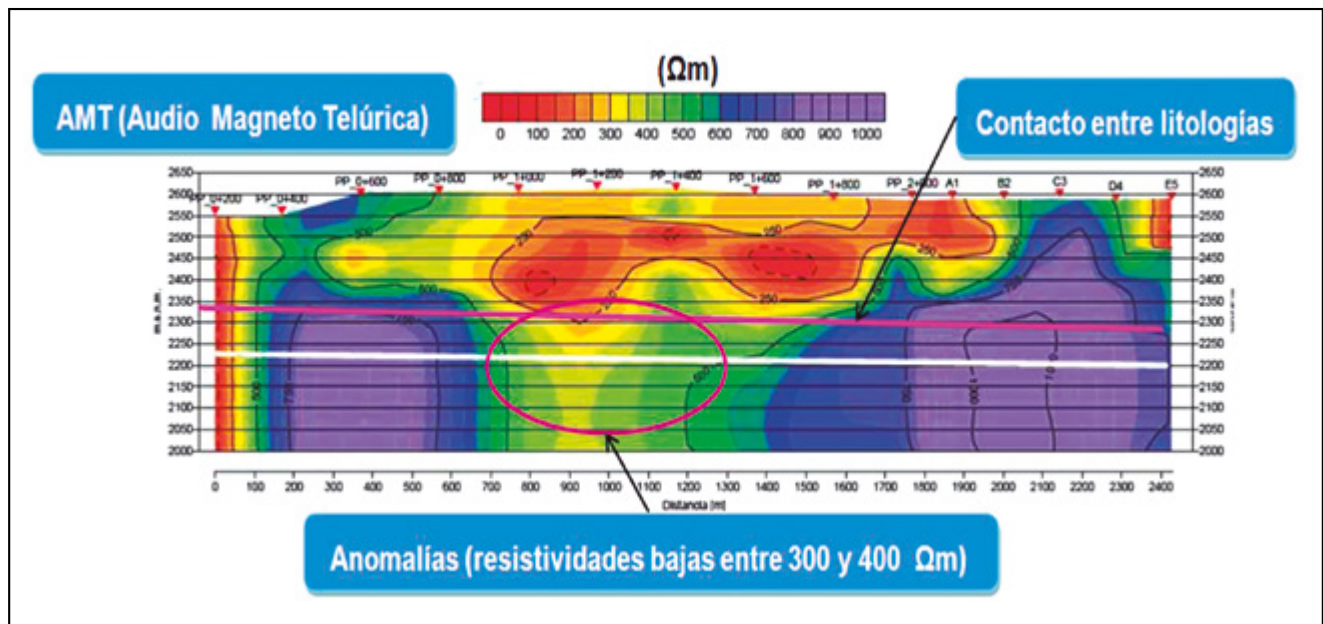


Figura 8. Perfil de la investigación geofísica magneto telúrica del túnel Papallacta. Se indica la zona con anomalías de baja resistividad.

excavación profunda por debajo del basamento metamórfico, con máquina integral (TBM) y sólo se atravesaba el material volcánico y los depósitos aluviales antiguos durante las excavación de los pozos de carga y en la chimenea de equilibrio.

Al ser aceptada la propuesta de la empresa adjudicataria de realizar los túneles de forma convencional con perforación y voladura e iniciar los túneles en el nivel de las tomas sin pozos de carga, la rasante de la conducción se aproximaba hasta la zona de contacto volcánico-metamórfico.

En este contacto, la realidad encontrada durante la excavación fue muy distinta a la prevista inicialmente (figura 7), ya que, tal y como se muestra en la figura indicada se interceptó una gran paleovaguada en todo el contacto entre litologías:

A medida que avanzaban las excavaciones del túnel Papallacta y las ventanas 1,2 y 3 se evidenció la existencia de una gran “paleovaguada” rellena de materiales aluviales, lagunares y lahares antiguos que habían quedado recubiertos por las diferentes coladas de lavas y que tenían grandes

proporciones. Estos materiales aluviales antiguos, no se habían interpretado en la investigación geofísica realizada para justificar el nuevo modelo geológico ajustado al nuevo diseño altimétrico.

- c) Investigación geofísica interpretada sin contrastar las “anomalías” mediante métodos directos o sondeos.

Para avalar la propuesta del nuevo trazado, la empresa adjudicataria, solicitó la realización de una investigación geológica complementaria mediante el empleo de la geofísica, tal y como se ha indicado en los datos de partida. Concretamente se realizó geofísica mediante la técnica AMT (Audio Magneto Telúrica). Esta técnica consiste básicamente en la toma de medidas simultáneas de las oscilaciones del campo eléctrico y magnético local. Dicha investigación indicó la presencia a lo largo del nuevo trazado (altimetría) de rocas metamórficas de alta resistividad, entre las cuales se identificaron algunas anomalías de baja resistividad.

Las anomalías detectadas en dicha investigación (figura 8) zonas de baja resistividad entre 300 y 400 Ωm , se interpretaron zonas de contacto con diverso grado de meteorización, roca metamórfica y volcánica alterada, así como la presencia de esquistos grafitosos. En ningún caso se interpretaron estas anomalías con la presencia de materiales aluviales, tal y como sugería el modelo del diseño de licitación. Además, estas anomalías no fueron contrastadas mediante métodos directos, como por ejemplo mediante sondeos con recuperación de testigos. En base a los resultados de esta investigación, se propuso un nuevo modelo, que en definitiva fue el que sustentó la propuesta de modificación altimétrica.

- d) Existencia de una gran paleovaguada en combinación con elevada carga hidrostática.

Tal y como se ha podido verificar al actualizar el modelo geológico, así como del minucioso análisis de las evidencias externas, la paleovaguada que formaban los antiguos cauces de los ríos Papallacta y Quijos tenía unas grandes dimensiones y se ubicaban siguiendo un trazado muy similar al de las conducciones. Todo ello unido a una elevada carga hidrostática, dificultando en gran medida la excavación de los túneles en este tipo de ambiente.

- e) Metodología constructiva de la empresa contratista

Como ya se ha comentado, se aceptó la propuesta de la empresa contratista de excavar los túneles con técnica convencional (drilling and blasting) en vez de con TBM, al no disponer de la técnica ni de la maquinaria para realizar los túneles de forma mecanizada con TBM. Incluso con la adopción de esta técnica convencional, que requiere un menor grado de tecnificación, se ha demostrado que la empresa no dispone de equipos adecuados ni de la técnica suficiente para afrontar la excavación de estos túneles en ambientes volcánicos con geología compleja.

Medidas correctoras adoptadas

Dada la situación tan delicada, con todos los frentes de excavación colapsados a excepción del túnel de presión y sin tener claro el alcance de la afección, la gerencia de CELEC-EP así como la supervisión de CELEC ENERNORTE, decidieron adoptar una serie de medidas urgentes y que enumeramos a continuación:

- Creación de una comisión de especialistas para analizar la situación y contratación de asesoría técnica para supervisión de las obras subterráneas.
- Paralización de las obras subterráneas.
- Campaña de investigaciones complementarias (sondeos con recuperación de testigos y geofísica mediante sísmica de reflexión)
- Interpretación del nuevo modelo geológico. (Empresa GeoRisk. Dr. Geol. Daniele Battaglia)
- Análisis de alternativas para garantizar la viabilidad del proyecto y diseño de un esquema de conducción subterránea alternativo.
- Cambio en la metodología de excavación de los túneles de la empresa contratista CNEEC

3. INVESTIGACIONES COMPLEMENTARIAS Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO

Investigaciones complementarias

Tal y como se ha expuesto, la propiedad del proyecto CELEC-EP, a solicitud de la comisión de expertos, contrató los equipos necesarios para realizar las investigaciones complementarias recomendadas. En la figura (figura 9) se indica la propuesta de sondeos a realizar, así como los perfiles de geofísica con sísmica de reflexión que se estimaron necesarios.

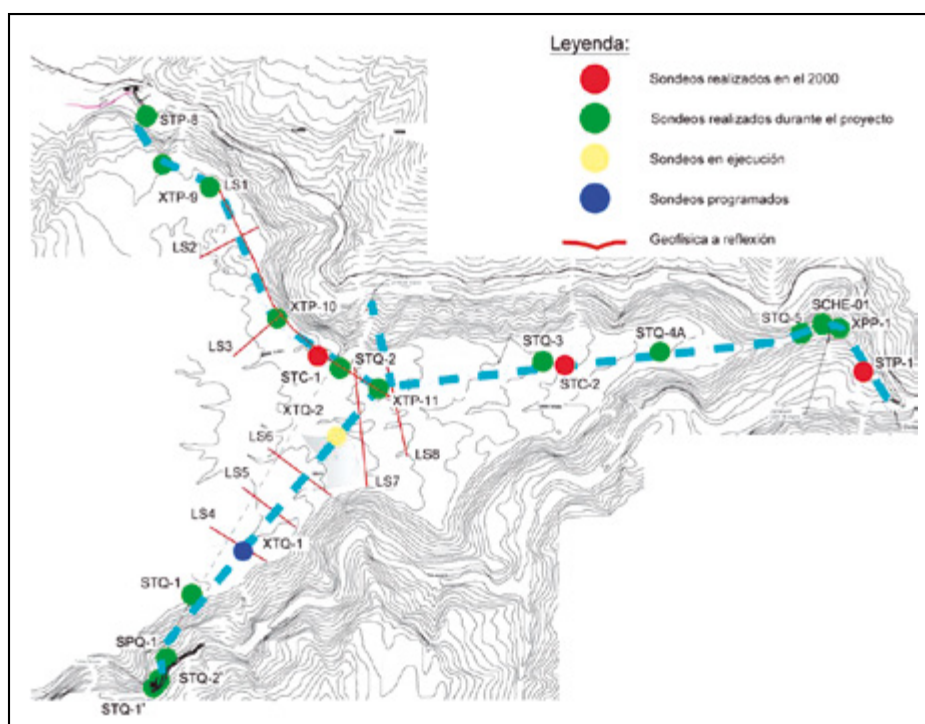


Figura 9. Propuesta del plan de investigaciones complementarias (cortesía de Lombardi).

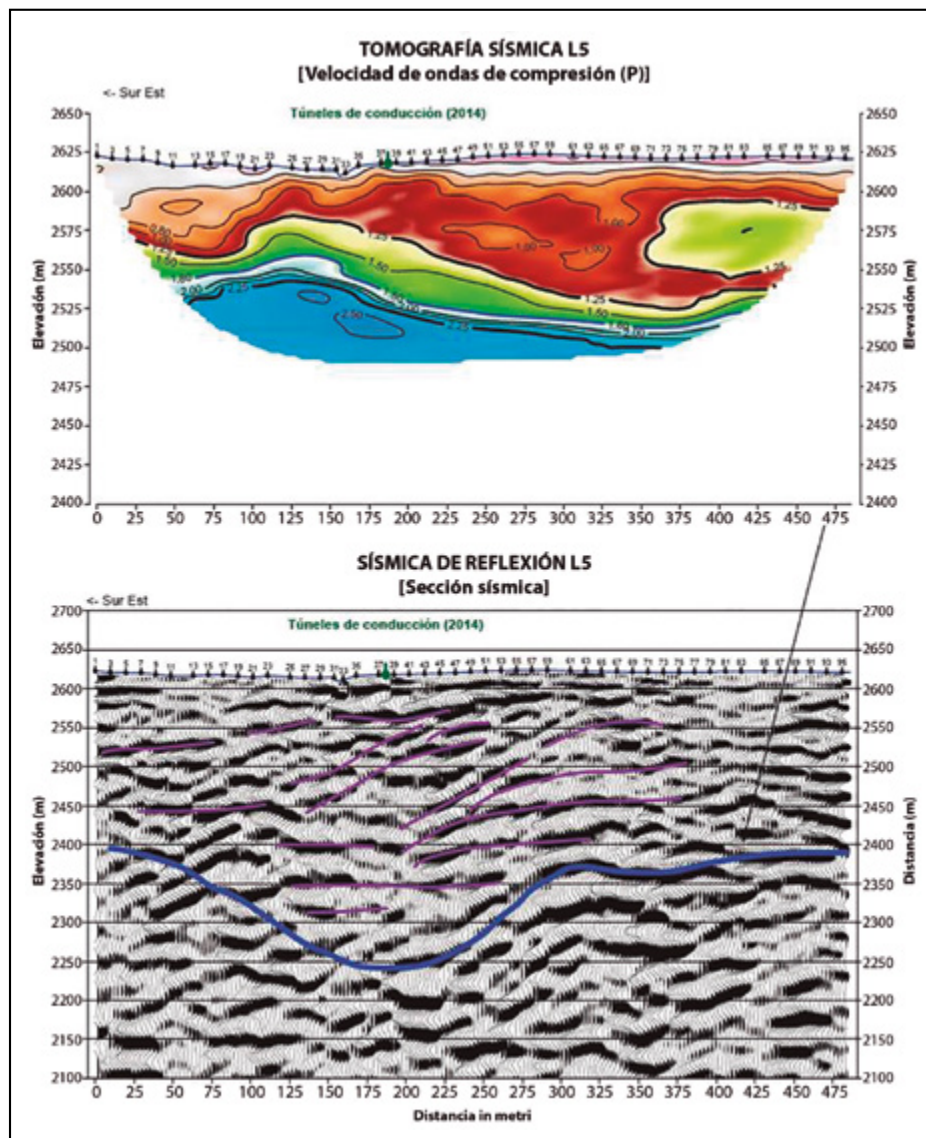


Figura 10. Tomografía sísmica y sísmica de reflexión. (Cortesía de Lombardi-Progeo).

También se consideró importante interpretar convenientemente la investigación geofísica magneto-telúrica que sirvió de base para validar los cambios propuestos, contrastando el carácter de las anomalías detectadas con sondeos con recuperación de testigos.

La investigación geofísica complementaria, se desarrolló a través de la técnica de sísmica de reflexión para obtener las profundidades requeridas por la investigación, pero también a través de la tomografía sísmica (figura 10), cuyo objetivo no era el de obtener información sobre la profundidad a la que están previstos los túneles, sino obtener información fundamental sobre las velocidades de los materiales en los primeros 50-100 m desde el nivel del suelo de las que se extraen los parámetros de corrección estática para los análisis de reflexión, que dependen tanto de la topografía como también de las velocidades del primer subsuelo.

Esta exigencia nace de la elevada anisotropía geológica presente in situ debida a la presencia de sucesiones de materiales aluviales recientes, lavas que se depositaron en varios eventos paroxísticos e inundaciones subyacentes relativas a materiales prevolcánicos.

Los objetivos fundamentales de las nuevas investigaciones son:

- Poder determinar la localización y profundidad del paleocauce con la mayor precisión posible
- Determinar la frecuencia y extensión de intercalaciones de depósitos no-consolidados (fluviales, lacustres, laháricos).
- Instalación de piezómetros para fijar los niveles piezométricos y su evolución.
- Ensayos de permeabilidad Lugeón
- Poder realizar ensayos de hidrofracturación, pruebas dilatométricas para el posterior diseño del revestimiento y blindajes de la conducción
- Obtención de muestras inalteradas para permitir la realización de ensayos de materiales

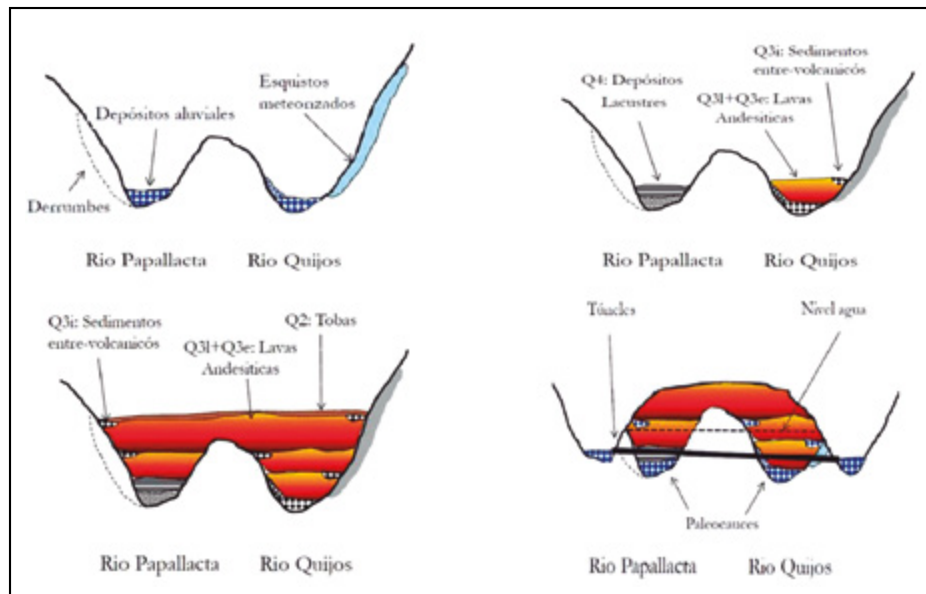
También es de reseñar la realización de sondeos exploratorios horizontales e inclinados en los frentes donde se interceptaron los rellenos aluviales.

Actualización del modelo geológico-geotécnico

A partir de la información obtenida de las excavaciones de los túneles y ventanas ya ejecutados, así como de los sondeos realizados en la fase de diseño y ahora en la etapa de construcción, se pudo determinar una geología

Tabla 2. Resumen de investigaciones realizadas y ratio (m_s/m_t)

Campaña	Unidades (sondeos)	Longitud total (m)	Ratio m_s/m_t
Fase inicial. Diseño de Licitación (Año 2000)	4	950	0,1
Fase construcción y campaña complementaria.	15	2.500	0,25
TOTAL	19	3.450	0,35
Geofísica Audio Magneto Telúrica		7.000	
Geofísica mediante sísmica de reflexión y tomografía sísmica		4.500	

**Figura 11.** Modelo conceptual del complejo vulcano-sedimentario (Interpretación de GeoRisk).

diferente y mucho más compleja que la prevista inicialmente.

La empresa GeoRisk, realizó un levantamiento geológico y geomorfológico de superficie analizando todas las evidencias externas de las paleovaguadas, mediciones hidrogeológicas de los principales ríos y avenidas de aguas, análisis de todas las investigaciones ejecutadas hasta el momento en el sitio del monitoreo, control de los piezómetros y revisión de los avances de excavación de los túneles ya excavados. Con toda esta documentación se realizó un nuevo modelo geológico con mayor precisión a los modelos inicial y de construcción.

Esta geología puede ser explicada de forma conceptual, tal y como sugirió el **Dr. Geolg Danielle Battaglia** de GeoRisk, de la siguiente forma:

Previsiblemente, en el área del proyecto existía la confluencia de los paleocauces de los ríos Papallacta y Quijos. Estos cauces habían excavado sus cauces en el basamento metamórfico a un nivel inferior al actual y se habían depositado materiales aluviales durante largo tiempo. Por otro lado, en las laderas la roca metamórfica se encuentra meteorizada y afectada por derrumbes naturales.

La actividad del Volcán Antisana produjo varios flujos de lava que bajaron al valle del río Quijos. Las lavas cubrieron el valle antiguo atrapando los depósitos aluviales y los esquistos meteorizados, depósitos eluvio-coluviales y de derrumbe (en las paleo-laderas). Todos estos antiguos depósitos constituyen las zonas de suelos que se están encontrando actualmente excavaciones en las excavaciones subterráneas.

Las lavas cerraron el flujo del agua del río Papallacta produciendo presas naturales y la formación de embalses en

los cuales se depositaron sedimentos lacustres (material que se encuentra ahora en el Túnel Papallacta), lahares y depósitos aluviales. Los sucesivos flujos de lava generaron por lo tanto una secuencia de depósitos vulcano-sedimentarios de elevada complejidad dado lo heterogéneo de los materiales encontrados durante las excavaciones.

En la figura 11 se muestra el modelo conceptual de la formación de este complejo vulcano-sedimentario:

En la figura 12 se puede ver la interpretación de la situación actual, una vez los ríos Papallacta y Quijos volvieron a excavar los nuevos cauces. Se interpreta también, los niveles de la napa drenante y la posición de los túneles en el diseño de construcción.

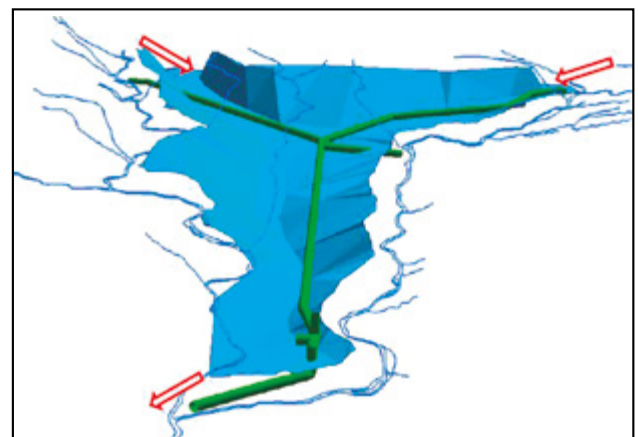
**Figura 12.** Modelo conceptual del gran paleocauce. (Interpretación de GeoRisk).



Figura 13. Evidencias externas. Posible entrada del paleocauce desde el río Papallacta (Interpretación de GeoRisk).

4. ALTERNATIVA B. "ESQUEMA SUPERIOR"

Tras el análisis de las alternativas técnicamente viables y teniendo en cuenta que el contratista no tiene suficiente capacidad técnica ni disponibilidad de los equipos necesarios para realizar la excavación con máquinas integrales, se adopta como alternativa más ventajosa a la **ALTERNATIVA B. Esquema superior**. Por un lado, esta alternativa permite aprovechar más longitud de túneles ya realizados y se reduce la carga hidráulica, con lo que se adapta mejor a la metodología de excavación del contratista. No obstante, se deberán incorporar mejoras en equipos y procedimientos, para poder hacer frente con garantías de éxito a las excavaciones en zonas con paleocauces secundarios o rocas volcánicas meteorizadas o de baja calidad (escorias, cenizas, etc.) que casi con toda probabilidad se tendrán que atravesar.

Esta alternativa, se caracteriza por pasar a un esquema clásico, de "baja presión", manteniendo los túneles del sistema de conducción entre las cotas de las tomas 2.320 msnm y la cota de 2.216 msnm de la Chimenea de Equilibrio, con una pendiente variable entre tramos de 0,2 % y 10 % (promedio 1,5 %). Un pozo vertical de 135 m de longitud a unos 115 m al este de la chimenea, conectándose con el túnel de presión, a la elevación de 2.073 msnm. Se aprovechan los últimos 670 m del túnel de presión ya realizados. Para construir el pozo y la chimenea se prevé realizar la Ventana 4, de 105 m de longitud, a la cota de 2.214 msnm que permitirá a la vez poder iniciar la excavación del túnel principal desde aguas abajo. Esta solución, también permite la ejecución de una ventana 5 para añadir nuevos frentes de trabajo y facilitar la fase de revestimiento de los túneles.

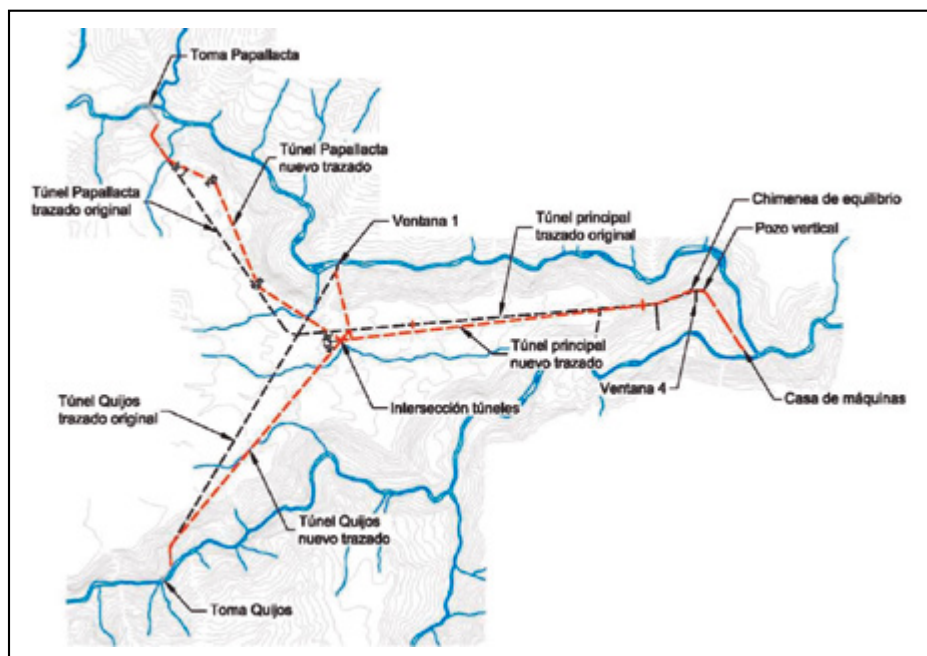


Figura 14. Esquema conceptual de la alternativa B. Esquema superior comparado con el trazado inicial (Cortesía de Lombardi)

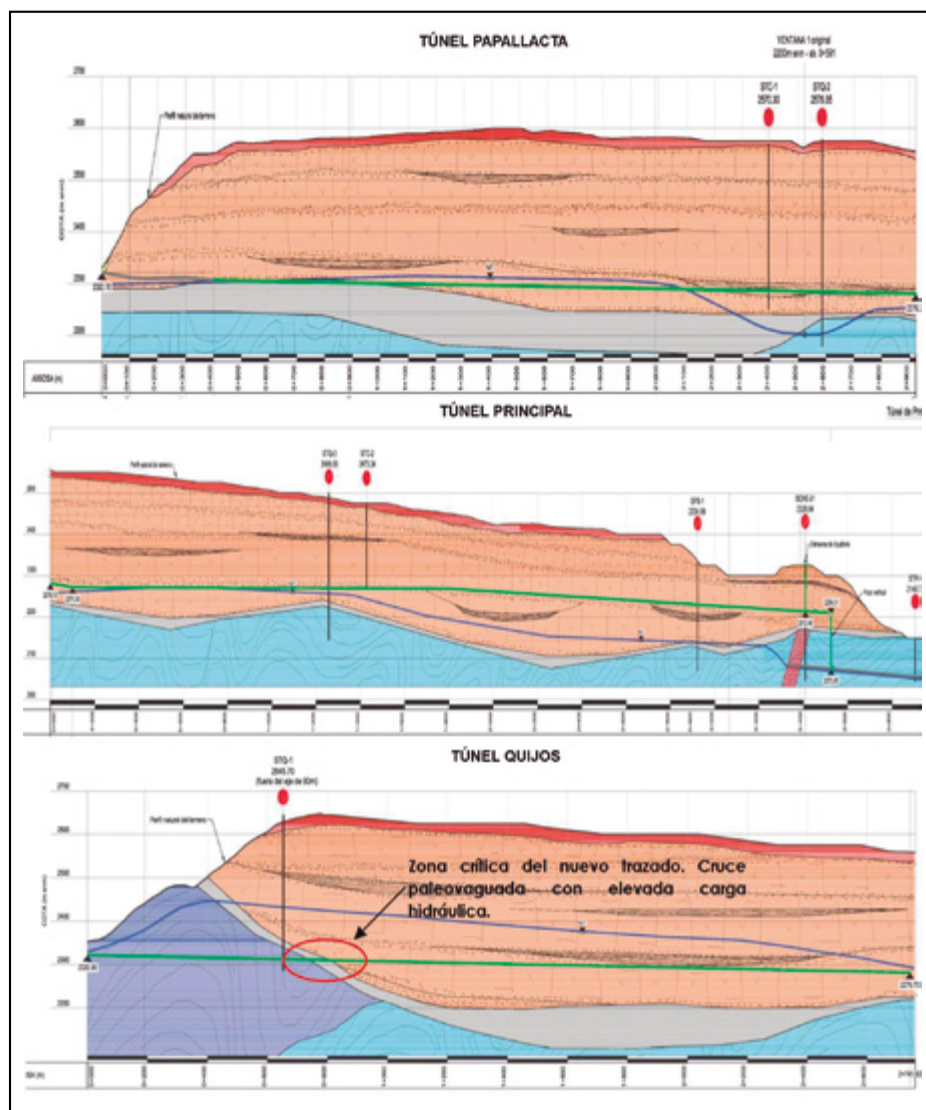


Figura 15. Esquema conceptual de la alternativa del esquema superior. (Cortesía de Lombardi).

En las figuras (figura 14 y figura 15), se muestra un esquema conceptual en planimetría y altimetría comparando con el trazado original que se ha descartado.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proyecto Hidroeléctrico Quijos había atravesado serias dificultades durante la excavación de las obras subterráneas, que incluso habían hecho pensar a la promotora CELEC-EP en paralizar la ejecución definitivamente y abandonar el proyecto. De los cerca de 2.300 m de túneles ya excavados, hubo que abandonar más de 1.100 m (48 %) y buscar un trazado alternativo para poder continuar.

Con las investigaciones realizadas para actualizar el modelo geológico, así como con el diseño del nuevo trazado de los túneles, ajustado a dicho modelo geológico y el cambio de metodología en la excavación, ha sido posible reanudar los trabajos. Actualmente las excavaciones avanzan a buen ritmo con más de 2.500 m excavados del nuevo trazado y sin incidentes reseñables.

A modo de resumen se indican una serie de conclusiones y recomendaciones

- Como se ha puesto de manifiesto, es muy importante realizar una buena campaña de investigaciones y reconocimientos en fase de diseño. En estos empla-

zamientos es siempre complicado realizar estas campañas por la falta de accesibilidad, permisos, etc. pero es indispensable realizar el esfuerzo e inversiones iniciales. Hay que tener en cuenta que a mayor intensidad de las investigaciones, menor es el riesgo. Los errores durante el diseño sólo se subsana en la construcción con sobrecostos a veces muy elevados.

- El modelo geológico inicial era poco preciso y había muchas evidencias externas de paleocauces que no habían sido detectadas.
- Incluso con la excavación mecanizada con TBM prevista en el diseño inicial se habría tenido serios problemas, ya que las paleovaguadas, especialmente en el túnel Quijos eran muy profundas.
- Se aceptó inicialmente un cambio transcendental del modelo geológico con una investigación “indirecta” no contrastada con sondeos.
- Para este tipo de proyectos se necesitan buenos proyectos y estudios de detalle, en vez de estudios de factibilidad, a veces muy básicos.

6. AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC-EP y a su unidad de negocio CELEC-Enernorte y

en especial al **Ing. Gonzalo Cobo Regalado** por haber confiado en nuestra capacidad técnica para ayudar a superar las dificultades y autorizar la publicación de este artículo, en calidad de Administrador del Contrato y Jefe del Proyecto Hidroeléctrico de Quijos.

Al Ingeniero **Geólogo Francisco Cruz** de CELEC-EP por toda la documentación facilitada y por sus explicaciones y aclaraciones.

Al **Geólogo Fabián Burbano** Jefe de Geología de la Fiscalización formada por Astec-Integral de Colombia y al **Ing Fabio Micheli** Jefe de Proyecto por parte de **Lombardi** por haber facilitado planos, figuras e informes del nuevo diseño de los túneles.

Al **Dr. Geol. Daniele Battaglia** Especialista Geólogo de **Georisk** por su brillante interpretación del nuevo modelo geológico.

También, por último, a mis compañeros en el **Consorcio ITH**, formado por las empresas **Inclam, TYPESA y Hospiplan** al **Ing. Alberto Salera Llabra** Director General de ITH, al **Dr. Ing. Claudio Olalla Marañón** Especialista Geotécnico de ITH, al **Dr. Ing. Francisco Sánchez Caro** Jefe de Fiscalización del Consorcio ITH. A todos ellos por sus buenos consejos, recomendaciones y por su apoyo.

7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS:

Studio Georisk, 24/12/2013. Informe de Visita 13 Noviembre 5 Diciembre 2013, R01-22-13.

Informe General Anexo B Geología y Geotecnia Diseño de Licitación (2000).

GDTes, 26/09/2012. Investigación MagnetoTelúrica documento 1827_r01.

Informe técnico de investigaciones geofísicas. Lombardi S.A Ingenieros Consultores-Sucursal Ecuador, y Progeo S.r.l. (Agosto, 2014)

Bourdon, E., Eissen J., Monzier M., Robin C., Martin H., Cottin J. y Hall M. (2002). *Adakite like lavas from Antisana Volcano (Ecuador): evidence for slab melt metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone*, *Journal of Petrology*, Vol 43, n.2, pp 199-217.

Eguez A., Alvarado, A y Yepes H. (2003). *Map of Quaternary Faults and Folds of Ecuador and Its Offshore Regions*, Escala 1:250.000

Stewart, R.R. (1996). *Exploration Geophysics Tomography: Fundamentals*. Course Note Series. Volumen 3. Society of Exploration Geophysics. Tulsa.

Aki, K. and Chouet, B. (1975). *Origin of Coda Waves: Source, attenuation and scattering effects*. *J. Geophys. Res.*, 80, 3322-3342
Johnston, D. H., 1981, *Attenuation: A state-of-art summary: Seismic Wave Attenuation*, in Toksoz, M. N. and Johnston, D. H., Eds. *Geophysics reprint series*, No. 2: Soc. of Expl. Geophysics

Yilmaz, O. (1987). *Seismic Data Processing, Investigations in Geophysics*, vol. 2, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 1987.

Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional de Ecuador. Recuperado de [http:// www.igepn.edu.ec](http://www.igepn.edu.ec).