

2019

CONDICIONES DEL MACIZO ROCOSO SOBRE EL QUE SE UBICA HIDROITUANGO



<https://noticias.caracol.com/sites/default/files/galleries/201805/hidroituango-panoramica.jpg>

JUAN DAVID RAMÍREZ SIERRA
BIBIANA ECHEVERRI RIOS
DAPARD

19-7-2019

CONTENIDO

HIDROITUANGO: QUE PASÓ, PORQUE PASÓ ¿QUÉ ESTÁ PASANDO Y QUE PODRÍA PASAR?	2
Componente Geología	2
Componente Geotectónico	2
EMERGENCIA HIDROITUANGO COLOMBIA.....	3
INFORME UNIVERSIDAD NACIONAL (Mayo 2018)	5
Equipo asesor Gobernación	6
CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA.....	6
DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LA CONTINGENCIA.....	7
Marco Geológico	7
Condiciones Pre-Contingencia	9
Condiciones posteriores a la contingencia	10
Deslizamiento “Romerito”	10
Efecto de las vibraciones sobre el macizo rocoso en el complejo de cavernas	11
Análisis de estabilidad del complejo Cavernas	12
<i>Modelo Esfuerzo-Deformación</i>	12
<i>Análisis cinemático de caída de cuñas</i>	12
Análisis de estabilidad por caída de cuñas	13
<i>Efecto de caída de cuñas</i>	13
Estabilidad considerando falla de los pozos de compuertas	14
INFORME GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LA CONTINGENCIA V2.....	14
Talud parte alta captación “Romerito”	15
Cavernas	16
Sistema auxiliar de Desviación	16
Desviación original	17
Conducciones	17
Condición de estabilidad general	18
CONCLUSIONES.....	19

HIDROITUANGO: ¿QUE PASÓ, PORQUE PASÓ, QUÉ ESTÁ PASANDO Y QUE PODRÍA PASAR?¹

Componente Geología

Muro del proyecto construido sobre rocas metamórficas tipo gneis cuarzo-feldespático de aspecto esquistoso con bandas micáceas moscovíticas, pertenecientes al Grupo Valdivia con edades de 400 a 500 millones de años, presenta meteorización en los 10-15 metros de profundidad desde la superficie, recubierta por derrubios en los primeros de vertiente y acumulaciones coluviales de edad Cuaternario (0-2,6 m.a).

Hay presencia de eventos orogénicos y tectónicos que le han dado al terreno un alto grado de deformación y fracturamiento a las rocas aflorantes en la zona de interés. Por la zona atraviesan el sistema de fallas de Cauca-Romeral con las fallas Santa Rita Este y Oeste y a nivel local están las fallas de Tocayo y Mellizo asociadas de a nivel regional. Las obras principales se encuentran ubicadas sobre el cuerpo geológico descrito.

Componente Geotectónico

En la zona se presenta un macizo rocoso altamente fracturado con cobertura de depósitos no litificados y suelos residuales con vegetación. A medida que se van realizando las obras del muro y de los túneles el macizo presenta una descompresión y reacomodamiento lo que llevan al debilitamiento del macizo y a la permeabilidad llevando al macizo homogéneo a presentar problemas geotécnicos por incrementos en la susceptibilidad a la desestabilización.

Adicional a lo anterior, las rocas gnéissicas al humedecerse presentan un debilitamiento en su resistencia entre una tercera parte y la mitad respecto a la resistencia original. La orientación de los planos de las discontinuidades del macizo rocoso están orientadas con la vertiente derecha del cañón del río Cauca y esta característica hace que la zona sea apta a movimientos en masa que son altamente susceptibles a la presión del agua o a la ocurrencia de un sismo o a ambas juntas lo que conllevaría a la probable falla geotécnica del macizo rocoso.

Del análisis anterior se concluye que la susceptibilidad del macizo rocoso la define principalmente las orientaciones de las estructuras de la roca que van en sentido favorable hacia la vertiente del río Cauca, lo que llevaría a que ante una posible afectación de la ladera comprometida se colapse y descienda de manera directa hacia las aguas contenidas en la

¹ Hidroituango: ¿Qué pasó, por qué pasó, qué está pasando y qué podría pasar?. Modesto Portilla Gamboa. Bogotá, 2018.

presa y sumado a los esfuerzos de las fallas Mellizo y Tocayo el movimiento se pueda acelerar y afectar a nivel local todas las obras ubicadas dentro del área comprometida.

Las evidencias del fallamiento o la esquematización del inicio de un proceso de deterioro en el macizo rocoso están basados en información secundaria no comprobada en laboratorio, se tomaron documentos existentes de tiempo atrás a los cuales no se les ha realizado una actualización por medio de ensayos petroquímicos y petrofísicos que den una realizad más certera de la situación actual de cómo evoluciona el macizo rocoso.

El informe del profesor Portilla no da argumentos suficientes y estudios completos que permitan determinar las condiciones del macizo rocoso, únicamente menciona que durante la etapa de factibilidad del proyecto la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso (Criterio de Hoek y Brown) sobre el que se realizaron las obras es de $200,18 \text{ kg/cm}^3$ (19,63 Mpa) y de $93,33 \text{ kg/cm}^3$ (9,05 Mpa) para la roca meteorizada o suelo; mientras que de acuerdo a los ensayos de compresión simple mostrados en el documento del Estudio de impacto ambiental, estas resistencias variaron entre 42 y 121 Mpa (Sociedad Hidroeléctrica Pescadero Ituango, 2007). Además, la orientación de una de las familias de diaclasas es de N10E/70NW y la orientación de la ladera en derecha del río Cauca es de N-S/80W por lo que la zona es susceptible a movimientos en masa.

Además, propone que el macizo rocoso se está debilitando y está en la trayectoria falla/rotura, basándose en la declaración del Gerente General de EPM el 11 de Julio donde informó: “El día viernes 6 de Julio en horas de la tarde/noche, el sismógrafo instalado en la zona, detectó un movimiento sísmico en el interior del macizo rocoso en un túnel de acceso a la Casa de Máquinas” sin tener en cuenta el contexto de lo pronunciado a no recurrir a los eventos detectados por las demás estaciones sísmicas ubicadas en el área del proyecto y en la zona circundante.

Finalmente, define el estado actual del macizo rocoso (julio 11 de 2018), con base en fotografías, proponiendo que las cicatrices de movimientos en masa se están ampliando sin demostrar evidencias de la actividad que se presenta.

EMERGENCIA HIDROITUANGO COLOMBIA.²

Este informe se centra principalmente en la ocurrencia de los movimientos en masa para intentar explicar las condiciones en las que se encuentra el macizo rocoso, por consiguiente se menciona que con respecto a la ladera derecha, durante la misión ocurrió un

² EMERGENCIA HIDROITUANGO COLOMBIA Mayo 2018. ONU-Medio Ambiente, OCHA (JEU), 2018.

deslizamiento el 26 de mayo de 2018 por lo que existe un riesgo elevado de nuevos deslizamientos cuyas consecuencias dependen principalmente del volumen desplazado y de la rapidez del derrumbe. Al correlacionar los eventos ocurridos, se identifican estructuras y discontinuidades en los tres frentes de los deslizamientos, el primero en dirección N50-60E asociado al plano de falla Los Mellizos y a la falla Tocayo, un segundo plano perpendicular al plano de falla y un tercer plano de cara al embalse que serviría como superficie de deslizamiento y que pudo generar algunas cuñas en la sección del primer deslizamiento sobre la Galería Auxiliar de Desviación, y los deslizamientos sobre los túneles de desviación y el de casi encima del vertedero; estas discontinuidades y planos repetitivos pueden generar cuñas o bloques con susceptibilidad a fallar y caer, al experimentar nuevos esfuerzos.

Considerando las cicatrices de antiguos deslizamientos en la zona y la ampliación que ha tenido el derrumbe sobre los túneles de desvío y el derrumbe sobre el vertedero, estiman que estos deslizamientos se seguirán expandiendo conforme experimenten nuevos esfuerzos, ya sea por presiones internas y/o redistribución de esfuerzos en el macizo o por la presión generada por el incremento de nivel en la cota del embalse.

Se reporta para el día 28 de mayo que algunas de las cicatrices de los deslizamientos aceleraron su movimiento, generando unas grietas de aproximadamente 60 m arriba del deslizamiento del sábado 26 de mayo a lo largo del camino entre las torres de energía; y movimiento de las ya existentes en la base militar, evidenciando la aceleración de las deformaciones que se van presentando en la zona; además indican que de acuerdo a archivos históricos de Integral, se pudo observar que los inclinómetros instalados cerca de esa zona, han presentado movimientos y deformaciones hasta centimétricas a lo largo del tiempo.

Finalmente, a raíz de la visita que hicieron a las obras subterráneas; indican que en las obras subterráneas que interceptan la galería N° 7, observaron grietas de extensión y compresión en el macizo rocoso, caída de bloques y fracturas en el hormigón proyectado, deformaciones de los refuerzos metálicos, entre otros. Estas deformaciones se evidenciaron tanto en los túneles de acceso a las compuertas como en el túnel vial, especialmente en la zona donde se intercepta con la falla los Mellizos. La presión a la que está sometido el macizo, no solo ha deformado las paredes de los túneles, sino que también se evidenció en un levantamiento del piso del mismo, sugiriendo que está soportando esfuerzos en varias direcciones.

La información recopilada es de carácter cualitativo sin tener análisis de laboratorio o pruebas de campo que permitan determinar fehacientemente la estabilidad del macizo rocoso, se indica la presencia de agrietamientos y zonas de presión que se sienten incluso por los sentidos como la vista y la audición, las herramientas utilizadas para el análisis

consisten en visitas a los sitios afectados, observación directa, entrevistas con actores claves y la revisión de documentos aportados por las firmas involucradas en el proyecto y sus socios, como referentes visuales se procesaron videos e imágenes satelitales.

El documento tiene más aplicación en el sistema de evaluación de los riesgos y al aporte a los planes de contingencia, la referencia al macizo rocoso la determina cuando analiza cada una de las situaciones presentadas que afectaron la geología en donde están embebidas cada una de las obras, entre ellas la casa de máquinas, la GAD, el TDD y otros, a pesar de que las observaciones y definición de las situaciones presentes dan una idea del macizo en particular, al unir cada una de las observaciones realizadas se puede tomar un criterio general acerca del macizo teniendo como resultado que las afectaciones puntuales presentes en las obras subterráneas obedecen a eventos específicos de corto tiempo que han afectado debido a esfuerzos comprensionales y distensionales las obras realizadas, entre estos efectos se encuentra el “golpe de martillo” el cual fue ampliamente divulgado en los medios en donde se observa una fuerte liberación de energía al ser limitado el flujo del agua por una de las conducciones por donde estaba siendo evacuada.

INFORME UNIVERSIDAD NACIONAL³

Inicialmente es necesario describir la calidad del macizo rocoso en las condiciones antes de la emergencia. Se puede inferir que la calidad del macizo es media a baja en el sector sur de casa de máquinas, medido por el GSI Índice Geológico de Resistencia, con 85% de valores en los rangos de 40 a 60 (sobre 100).

La emergencia ocasionada en el proyecto no se debe propiamente al bloque basculado; sin embargo, de haber sido reconocido en la etapa de factibilidad o de diseño, se hubiera procedido a realizar estudios de detalle (exploración geotécnica exhaustiva) para conocer el comportamiento de las estructuras que lo afectan. Además, para el macizo rocoso de la margen derecha donde se alojaron las obras principales de generación, las exploraciones fueron insuficientes en cantidad y en profundidad.

No se evidencia una conexión entre los deslizamientos superficiales y las deformaciones internas del macizo como las que se han manifestado en el túnel vial, hasta ahora, las obras con posibilidad de ingreso muestran diferentes grados de afectación desde ninguno hasta

³ CONTRATO No. 2018-SS-26-0001. ASESORÍA AL CONSEJO DEPARTAMENTAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES EN EL MARCO DE LA DECLARATORIA DE CALAMIDAD PÚBLICA N°D2018070001272 DE MAYO 14 DE 2018, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN QUE REPOSA EN EL PROYECTO HIDROELECTRICO ITUANGO, CON EL FIN DE PREVENIR Y/O MITIGAR LOS POSIBLES RIESGOS O DAÑOS GRAVES E IRREVERSIBLES A LAS VIDAS, BIENES, Y DERECHOS DE LAS PERSONAS Y A LOS ECOSISTEMAS. DAPARD y Universidad Nacional de Colombia. Octubre 2018.

caídas de bloques de rocas de varios metros de extensión, definiendo sobre excavaciones de dimensiones significativas con relación al tamaño de las excavaciones originales, se tiene conocimiento y evidencia fotográfica sobre una considerable sobre excavación, tanto en el techo como en las paredes del túnel, esta sobre excavación puede tener aproximadamente 5 m tanto de alto como de ancho. En el suelo se pueden observar los bloques angulosos producto de la sobre excavación.

Como consecuencia del llenado anticipado e incontrolado del embalse, se han presentado filtraciones de agua en las obras subterráneas (galerías y túneles).

Equipo asesor Gobernación

Con relación a la estabilidad del macizo de la margen derecha, concluir un volumen mayor de 30 millones de metros cúbicos para un posible deslizamiento corresponde al peor escenario que se pueda considerar, pero se requiere de estudios adicionales para poder definir exactamente por donde es el plano de deslizamiento (en caso de serlo profundo) o como se está comportando el macizo en toda esta zona para estimar un volumen apropiado.

A la fecha, los monitoreos que se han realizado a las grietas permiten definir algunas de las coronas de posibles desgarres encima del deslizamiento "Romerito"; sin embargo, es importante mencionar que los pequeños deslizamientos que se han observado hasta ahora son netamente superficiales con desplazamiento de material fino en volúmenes tan pequeños que no son significativos.

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA.⁴

El macizo rocoso en donde están ubicadas las obras corresponde a rocas metamórficas del Paleozoico originada durante eventos tectónico-metamórficos sobre la cordillera central, su origen es regional con variaciones de metamorfismo de grado muy alto hasta medio.

Las unidades de influencia en la que el proyecto se encuentra ubicado son Esquistos (PZE) con intercalaciones de diferentes composiciones como son cuarzo sericíticos, cloríticos y grafitosos en orden de crecimiento de acuerdo a sus propiedades geotécnicas, la relación con el cuerpo gnéisico es gradacional a normal, como en cercanías a la zona de presa, la generación de suelos residuales es escasa y se da con espesores que no superan los 10 m.

Se encuentran también anfibolitas que afloran en la cola del embalse en ambas márgenes, tiene forma alargada y están controlados por el tren estructural regional de dirección N-S,

⁴ Caracterización Geológica y Geotécnica, Integral-Solingral. 2010.

estas rocas se encuentran afectadas por un intenso tectonismo que genera Fracturamiento que se evidencia en la mayoría de los afloramientos estudiados.

El otro cuerpo presente es el Gneis (Pzmf, Pznl) que corresponde a un conjunto de gneis cuarzo feldespáticos (Pzmf) y alumínicos (Pznl), presenta estructuras que varían de esquistosa, gnéssica y migmatítica, son plegados y con heterogeneidad de los sedimentos, sobre esta roca se desarrollara el proyecto.

Las obras se construirán en el paragneis cuarzo feldespático de textura esquistosa que están cubiertos localmente por coluviones en las vertientes y por un deposito aluviotorrencial.

De acuerdo al tipo de roca se analizaron los GSI (Geological Strength Index) dando como resultado la variación en la profundidad en donde está ubicado el macizo rocoso y se tiene que en la parte baja de la ladera el GSI alcanza valores altos más rápidamente que en la parte alta llegando a reportar valores de 60 GSI y por encima de este valor ubicados a 60 m de profundidad.

El estudio indica que la estabilidad de las laderas adyacentes al embalse presentan una probabilidad de falla menor al 5% y por lo tanto no constituyen una amenaza a la estabilidad de las obras; las condiciones topográficas, geológicas, geomorfológicas, geotécnicas y sísmicas sugieren considerar la posibilidad de generación de grandes movimientos en masa, se identificaron 11 sitios potencialmente susceptibles, pero se concluye que para que se presente uno de estos eventos, es necesaria una enorme aceleración estimada entre 0,5 y 0,68 g, por lo que la probabilidad de ocurrencia, estaría entre 0,012 % y <0,01%. Además, el evento de gran magnitud con mayor probabilidad de ocurrencia es una reactivación del Guásimo. Además, indica cuales fueron los parámetros obtenidos a partir de los ensayos realizados al macizo rocoso.

DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LA CONTINGENCIA.⁵

Marco Geológico

Entre 1978 y 1982 la consultora extranjera Woodward Clyde Consultants elaboro los estudios de amenaza sísmica, geomorfología y estratigrafía del cuaternario a partir de fotointerpretación, sobrevuelos, trabajos de campo, dataciones radiométricas y exploración del sub-suelo incluyendo un amplio recuento de los movimientos en masa sobre lo que se conoce como el cañón del Cauca.

⁵ Diagnostico Geológico Geotécnico de la Contingencia, EPM – Integral. 2018.

Posteriormente se realizó una actualización de los estudios y trabajos de campo con nuevas técnicas y conocimientos entre los años 2006 y 2009 por parte de la firma Integral S.A., los nuevos estudios geomorfológicos y geológicos valoraron la información obtenida por el consultor extranjero.

Esta etapa de estudios permitió aprobar la factibilidad del proyecto Hidroeléctrico Pescadero-Ituango, Hidroitango.

A partir del comienzo en la construcción del proyecto se ha realizado un monitoreo y actualización permanente del macizo rocoso permitiendo tener una idea clara acerca de su estabilidad en las condiciones geológicas y geomorfológicas.

Sobre la margen derecha de la cuenca del río Cauca en el sitio de presa se efectuó un análisis por sectores en las áreas próximas y de influencia de la presa, entre ellas tenemos tres sectores clasificados de la siguiente manera: 1) Zona de deslizamiento Capitán definida en los estudios de Woodward Clyde Consultants, 2) Zona de deslizamiento Tencha definida por Woodward Clyde Consultants y 3) zona de vertiente de influencia en la zona de presa.

Respecto al deslizamiento Capitán, ubicado aguas abajo del proyecto a una distancia aproximada de 1 a 2 km aguas abajo del sitio de presa, son varios movimientos separados y moderados en tamaño con una extensión de 1,5 km de largo y 600 m de ancho.

Su espesor está entre 30 y 50 m de acuerdo con perforaciones realizadas, además tiene influencia de la falla Santa Rita la cual no lo ha afectado de manera notoria debido a la baja actividad de la misma.

Por la condición de estabilidad de esta zona se autorizó su uso como botadero (Ticuita) y a la fecha de presentación del informe analizado no se ha presentado ningún proceso de inestabilidad de la ladera.

Frente al deslizamiento de Tenche descrito en el informe de Woodward Clyde Consultants en 1981, se indica que son una serie de movimientos que se unen y que son poco profundos con espesores no mayores a 20 o 30 m, sin reportar evidencia de movimientos actuales.

Basados en los cortes de la vía y en el perfil ubicado a lo largo de la ribera del río Cauca se puede indicar que esta zona no reviste problemas de estabilidad para las obras principales.

En la zona de presa y de obras principales ubicadas sobre la vertiente oriental del río Cauca no se observan en los trabajos de Woodward Clyde Consultants como en los de EPM-Integral y otros estudios más actualizados procesos de remoción en masa, ni cicatrices de movimientos.

No se evidencian rasgos estructurales desfavorables asociados de carácter regional, la ubicación del sistema de Fallas Santa Rita y Playa Negra que son las que generan principalmente los movimientos de la zona están ubicadas por fuera de la ladera bajo estudio, además la foliación se encuentra en sentido favorable con dirección de buzamiento contraria a la pendiente de la ladera.

Los sistemas de discontinuidades encontrados tipo diaclasas son indiferentes en cuanto a su actitud con respecto a la ladera en estudio exceptuando unas pocas cuñas superficiales las cuales se activaron durante la fase preliminar de excavaciones iniciales.

Previos a los eventos suscitados durante la contingencia no se observan rasgos geomorfológicos de procesos en la zona de la ladera derecha del sitio de SAD verificado por análisis de imágenes satelitales obtenidas entre 2017 y 2018.

De acuerdo con las apreciaciones anteriores es factible indicar que los procesos asociados al sitio de la presa y aguas arriba (Tenche) y aguas abajo (Capitán) no son generadores suficientes de inestabilidad del macizo rocoso, la evidencia está dada por lo superficial de los movimientos, este dato es indicado por Woodward Clyde Consultants y posteriormente avalado por EPM-Integral.

En el sitio de presa las condiciones estructurales de la roca son favorables debido a que no la afectan las estructuras que son favorables al talud de la ladera a excepción de algunos puntos ya identificados y tratados.

La única forma de detonar movimientos en la zona de estudio (Tenche, Capitán, sitio de presa) es con un sismo de 0,6 y 0,68 g (escala de Mercalli entre un sismo entre VIII y IX) cuya probabilidad de ocurrencia esta entre 0,013% y el 0,02% cuyos efectos de los deslizamientos (6m) no superarían los 15 m de borde libre que actualmente tiene la presa.

Condiciones Pre-Contingencia

Las condiciones estructurales de la zona son en general favorables ya que los rasgos de carácter regional como las fallas de Santa Rita y Playa Negra que son las principales generadoras de los movimientos de la zona, se encuentran por fuera de la ladera de estudio, además, la foliación tiene tendencia favorable con dirección de buzamiento contraria a la ladera; los sistemas de discontinuidades tipo diaclasa tienen en su mayoría actitud indiferente respecto a la ladera derecha, excepto por el sistema N10°E/60°NW, que controló unas pocas caídas de cuñas superficiales.

Respecto a los movimientos en masa, los identificados en estudios iniciales en la margen derecha denominados Capitán y Tenche, afectaron materiales superficiales y sus procesos se encuentran inactivos. Una menor cantidad involucra el macizo rocoso, estos pueden ser superficiales, con causas y detonantes similares a los movimientos en masa en suelo, o profundos que involucran grandes volúmenes y cuyos detonantes son exclusivamente sismos o procesos tectónicos que requieren una aceleración sísmica de entre 0,6 y 0,68 g, por lo tanto su probabilidad anual está entre 0,013% y 0,02%; además, los mayores deslizamientos encontrados, serían el de Chirí y el Guásimo con una altura de 6 m que es inferior a los 15 m de altura libre entre el embalse y la corona de la presa, por lo tanto no se generaría un sobrepaso.

Condiciones posteriores a la contingencia

Respecto a los fenómenos superficiales, se identificaron 4 zonas: A1_suelo donde se inició el deslizamiento "Romerito"; A1_concreto debajo de A1_suelo, donde se aplicó tratamiento de soporte, A3 que corresponde al cierre sur del vertedero en la parte alta y la zona A2 que corresponde a toda la excavación para los taludes en la plazoleta de Captaciones. De acuerdo al monitoreo con radar, se obtiene que las zonas A2 y A3 se encuentran estables, la zona A1_concreto presentó las tasas de deformación más aceleradas al inicio del monitoreo, estas fueron del orden de 3,7 cm/día, esta tasa disminuyó hasta el orden de 0,02 cm/día; por lo anterior se concluye que este sector presenta una tendencia a estabilizarse. Finalmente, la zona A1_suelo alcanzó la mayor tasa de deformación entre el 25 de mayo y 5 de junio cuando se registraron las mayores lluvias, con un valor aproximado de 6,9 cm/día, esta tasa fue decreciendo hasta 0,05 cm/día entre el 13 de septiembre y 11 de noviembre, lo anterior indica que este sector ha tenido una tendencia a la estabilización, sin embargo debido a las propiedades del material, es altamente susceptible a las aguas de escorrentía. Los sobrevuelos con drone permiten observar que la inestabilidad no ha remontado hacia la parte alta de la ladera, más allá de las grietas de tensión inicialmente evidenciadas y que hasta la fecha (ene, 2019) solo ha involucrado en su dinámica suelo residual con escaso material rocoso.

Deslizamiento "Romerito"

Se realiza un análisis geotécnico donde se evalúan 3 escenarios (estático, saturado, con sismo), la probabilidad máxima de falla en todos los escenarios es del 5%, lo anterior es un indicador claro de que la posibilidad de tener un proceso de deslizamiento masivo (que involucre toda la montaña) es muy baja, esto se ha corroborado en campo donde se observan algunas cicatrices cercanas a la zona del proyecto donde si bien, se han presentado deslizamientos, estos se han detenido una vez se encuentra la roca. Mecanismo de falla de una cuña en el macizo rocoso de la margen derecha:

Se consideran 3 escenarios:

1. Cuñas de rocas formadas por las familias de discontinuidades predominantes en el macizo
2. Todas las posibles cuñas formadas por la combinación de todas las discontinuidades levantadas
3. Formación de una cuña compuesta por una estructura subvertical y una discontinuidad sub-horizontal

De acuerdo a la caracterización geomecánica de las discontinuidades, la foliación es la estructura claramente dominante con una frecuencia total del 51,2%, de los cuales 12% corresponden a casos en los cuales se presentan zonas de cizalla asociadas a la foliación; respecto a las persistencias, las cizallas no asociadas a la foliación son las que presentan mayores persistencias (alta a muy alta) ya que se encuentran asociadas a las fallas dominantes, las diaclasas entre baja y moderada y la foliación moderada a alta. Se estiman los parámetros de resistencia para cada tipo de discontinuidad, de acuerdo al criterio de falla de Barton & Bandis, el parámetro JRC va desde 6 (cizallas) hasta 10 (Foliación) y correspondientemente JCS desde 41,2 hasta 68,7 kPa.

Para el escenario 1 se realiza un análisis cinemático que indica solo una combinación de diaclasas que formaría una cuña desfavorable la cual deslizaría hacia el W, se analiza esto para las zonas de captación, compuertas y vertedero; los resultados indican que la cuña de mayor tamaño se generaría en la zona 2 de compuertas y que tendría un volumen aproximado de 37.400 m³, lo anterior supone la ocurrencia de persistencias del orden de 200 m lo cual no se ha identificado en el proyecto ya que para las diaclasas, las persistencias de mayor frecuencia oscilan entre 1 y 30m, por lo tanto no hay probabilidad de que se generen cuñas de gran volumen que puedan afectar con severidad la integridad física de las obras en las zonas analizadas.

En el escenario 2 se encuentra que la cuña máxima tendría un volumen máximo teórico de 1.614.430 m³, esto implica persistencias de 606 m, las cuales son irreales ya que nunca han sido observadas, por lo tanto esta cuña es improbable, bajo este escenario, considerando las persistencias máximas reportadas de 30 m, la cuña máxima ya es estable (altura= 7m, F.S =4.5) y de un volumen bajo aproximado de 190 m³. Finalmente, para el escenario 3 que también se analiza para las zonas de captación, compuertas y vertedero se obtienen factores de seguridad superiores a 1,6 para las persistencias del orden de 30 m en la zona de captación, superiores a 1,0 para las persistencias típicas en la zona de compuertas y superiores a 1,5 para las persistencias típicas en la zona del vertedero. Para cualquiera de los 3 escenarios, en caso de que caiga una de los volúmenes estimados, la altura de la ola no superaría la cota de la presa, por lo tanto no habría sobrepaso.

Efecto de las vibraciones sobre el macizo rocoso en el complejo de cavernas

Se evalúan las deformaciones máximas del sistema, los valores de deformación máxima unitaria obtenidos son del orden de 3×10^{-7} en la zona de falla, lo cual es inferior a los valores de deformación máximos necesarios para producir desplazamiento en esta zona, este valor máximo según su comportamiento mecánico es considerado como 4×10^{-4} . De acuerdo entonces a los resultados de las modelaciones, puede concluirse que las vibraciones

generadas desde la casa de máquinas, no causan desplazamientos ni deformaciones relevantes al macizo ya que para producir un desplazamiento relevante se necesitaría una aceleración de 50 veces el valor de las aceleraciones máximas observadas.

Análisis de estabilidad del complejo Cavernas

Modelo Esfuerzo-Deformación

Los resultados muestran que la condición actual de funcionamiento de la casa de máquinas, bajo un escenario extremo de presión a 200 m.c.a; no debería representar condiciones desfavorables para el macizo, por el contrario, disminuye la deformación total en algunos milímetros. Sin embargo, lo anterior no contempla la oscilación de la presión al interior de las cavernas la cual se estima que puede estar a un delta de presión del orden de 15 m.c.a. y bajo la cual, los daños pueden ser significativos si se considera que la estabilidad cinemática de caída de bloques con presiones de oscilación que actuarían como presiones negativas en las caras de las discontinuidades es mayor a la soportada por estas estructuras.

Análisis cinemático de caída de cuñas

Se consideran 3 escenarios de deltas de presión correspondientes a 20 m.c.a., 15 m.c.a., 6 m.c.a. y 0 m.c.a. La presión de 20 m.c.a. corresponde a un valor estimado para la oscilación de la presión al interior de las cavernas para un evento extremo de baja probabilidad, los valores de presión adicionales de 15 m.c.a. corresponden a un escenario verificado en obra y el valor límite inferior de 6 m.c.a., representa una posible reducción de la presión de oscilación considerando el aporte de las perforaciones de drenaje instaladas de 18 m de longitud, espaciadas cada 3 m. Sin presión de agua 0 m.c.a. los factores de seguridad son superiores a 7.

Se realiza un análisis sin considerar el aporte del concreto lanzado, suponiendo un desprendimiento total de este como resultado de los cambios de presión, los resultados muestran que en ausencia de este, la máxima presión que soportarían las cuñas sería de 11 m.c.a., lo anterior muestra condiciones de inestabilidad en la zona de bóveda con cuñas importantes de hasta 93 m³ y ápices cercanos a 3 m de longitud, los F.S menores de 1 se obtienen para los siguientes escenarios:

1. Tratamiento completo considerando el aporte del concreto lanzado y pernos, y una presión en las caras de las discontinuidades desde 20 m.c.a. ya que para 15 m.c.a. se obtienen F.S mayores a 1,2.

2. Tratamiento con pernos, sin concreto lanzado y una presión en las caras de las discontinuidades desde 15 m.c.a., para un F.S de 1, la presión debe ser aproximadamente 11 m.c.a.

En conclusión, la máxima presión de oscilación que la condición cinemática estructural de las cuñas soportaría, corresponde a 15 m.c.a., en un escenario donde aporte todo el tratamiento instalado y hasta 11 m.c.a., sin considerar el aporte del concreto lanzado.

Análisis de estabilidad por caída de cuñas

Efecto de caída de cuñas

Para este análisis se consideran 3 escenarios con el objetivo de conocer si al generarse un posible colapso de la casa de máquinas o almenara, se produce una afectación sobre el pozo de compuertas de la conducción de entrada, el túnel vial o la galería de compuertas, los escenarios son:

1. Geometría inicial considerando el desprendimiento de la cuña en la bóveda de la caverna de casa de máquinas.
2. Geometría modificada a partir un supuesto primer desprendimiento que genera un colapso sucesivo y formando una pequeña chimenea en casa de máquinas.
3. Geometría suponiendo un desprendimiento ocurriendo de manera sucesiva en casa de máquinas y almenara.

Para el escenario 1 se obtuvo que sobre el pozo de compuertas, pozo de presión, galerías y túnel vial no se observan desplazamientos inducidos que afecten su estabilidad o comprometan el soporte instalado, se concluye que no se genera afectación sobre el sistema de conducción y galerías, así como sobre el túnel vial. Además, los esfuerzos transmitidos sobre los tensores no alcanzan su capacidad máxima.

El escenario 2 parte del 1, es decir, una vez generado el primer desprendimiento, se desencadenan una serie de otros desprendimientos sucesivos, provocando una chimenea en la bóveda de la casa de máquinas, como resultado se obtuvo que la chimenea debería tener una altura aproximadamente similar a la de la casa de máquinas, induciendo deformaciones sobre las paredes del pozo de conducción del orden de 12 cm que comprometerían el soporte instalado y la estabilidad de la excavación, la formación de una chimenea de esta magnitud es improbable ya que la roca no tolera tal magnitud de deformación antes de llegar a su colapso. Además, la galería de exploración que está en la cota 290 sobre la bóveda de la casa de máquinas está en buen estado y las perforaciones que se hicieron hasta la bóveda mostraron que el macizo y concreto están buenos.

Para el escenario 3 se simuló la formación de una socavación ocurriendo de forma simultánea en la bóveda de ambas cavernas, aunque existe la probabilidad de ocurrencia, se considera una probabilidad bastante baja, pues, según modelaciones hidráulicas, si bien la línea de energía en la casa de máquinas alcanza la bóveda 10 m por encima de esta, la condición en la almenara es distinta puesto que por las pérdidas que se generan en el flujo, la línea de energía del agua apenas sí alcanza la bóveda de esta. Se puede concluir que las deformaciones y los daños de los pozos no obedecen a fallos de las bóvedas de las cavernas tanto de casa de máquinas como de la almenara, esto se confirma con los resultados parciales de las perforaciones realizadas hasta las bóvedas de las cavernas donde se ha verificado que no hay sobreexcavaciones.

Estabilidad considerando falla de los pozos de compuertas

Se consideran 2 escenarios:

1. Efecto de la estabilidad de la conducción y pozo de compuertas por una subpresión de 100 m.c.a.
2. Efecto de la estabilidad de la conducción y pozo de compuertas debido a una eventual socavación ocurrida sobre el codo superior e inferior.

En el escenario 1, al simularse el efecto de la presión del agua sobre las paredes de los túneles de conducción, se obtuvo que este induce un desplazamiento despreciable, lo que significa que no genera un efecto importante sobre la estabilidad de las excavaciones. No obstante, es relevante entender la limitación que se tiene al realizar la simulación de esta forma puesto que la presión introducida representa una carga estática, mientras que el flujo de agua a través de la conducción genera deltas de presión por las oscilaciones de este. Para el escenario 2 se observa que para que afecte el pozo y la galería de compuertas, es necesario que la socavación desencadene un desprendimiento de bloques, formando una chimenea sobre este, aproximadamente de 36 m, lo que se estima poco probable dadas las dimensiones del pozo. Para la galería D, la situación es similar.

INFORME GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LA CONTINGENCIA V2⁶.

Hallazgos después de la despresurización de la casa de máquinas.

⁶ Diagnostico Geológico Geotécnico de la Contingencia - Volumen 2, EPM, Integral. 2019.

- La bóveda de la caverna de casa de máquinas se encontró en buen estado, no se observaron desprendimientos del soporte por lo que no se presentaron desprendimientos de cuñas. Desde la zona entre la unidad 3 y 4 se observó llena de material rocoso, lo cual en principio se atribuye al material de la oquedad de los pozos 1 y 2, túnel de acceso a casa de máquinas y almenara 2 (la culata sur de casa de máquinas y Almenara 2 aún no han podido ser inspeccionadas).
- Las virolas de las conducciones 1 y 2 (en la conexión con casa de máquinas) se encontraron en buen estado y sin obstrucciones.
- En la culata norte de Casa de Máquinas-parte baja, se observaron unos desprendimientos de roca.
- En el machón de roca entre la Almenara 1 y Casa de máquinas, se presentó una caída desde la solera casi hasta la bóveda, entre los túneles de aspiración 1 a 3 lo que puede deberse a colapsos provocados durante la descarga descontrolada del flujo hacia almenara 1.
- Sobre el hastial derecho de la Almenara, se observan desprendimientos, particularmente por la descarga 1. En la bóveda de la caverna de la Almenara 1 no se observaron desprendimientos.
- En la culata sur de la Almenara 1 también se observó la acumulación de material rocoso depositado en este sitio.
- En la Almenara sur, analizada mediante perforaciones se encuentran sin grandes afectaciones la culata norte y pares aguas abajo, así como la conexión con la galería de aireación. Existe una acumulación de material desde la parte inferior del sector norte y hacia las cotas superiores del costado sur. No se observan afectaciones en el soporte de bóveda y hastiales, a la fecha no es posible determinar afectaciones en la parte inferior de la excavación Almenara 2. No se identificaron afectaciones en la conexión del túnel de descarga 3 con la Almenara 2.
- En el pozo de ventilación de la Almenara 1 también se presentaron desprendimientos de roca en la conexión final.

Talud parte alta captación “Romerito”

De acuerdo con las mediciones, el movimiento no siguió remontando y la parte alta de la ladera se ha mantenido estable, se presentan desprendimientos por el proceso constructivo y desprendimientos de material suelto debido a la temporada de lluvias, las deformaciones de la parte alta se deben a la excavación que se está ejecutando en la parte alta del talud, en la parte media corresponden a la acumulación de material y en la parte baja no se evidencian movimientos. Se determinó el soporte requerido para la estabilización de la ladera hasta llegar la chimenea del deslizamiento El romerito. Una vez se complete la excavación, se continuará la exploración de la posible chimenea que conecta este deslizamiento con la galería D.

Cavernas

Las cavernas no sufrieron deformaciones generales si no locales por desprendimiento de bloques y por las oquedades por erosión debido al paso del agua; se comprobaron los análisis cinemáticos de caída de cuñas que mostraban la baja probabilidad de ocurrencia de esto ya que no se presentaron inestabilidades, a excepción de la Almenara 1 donde se presentaron fallos en el machón de roca entre la Casa de Máquinas y Almenara 1 por la forma como incidió el flujo allí; para esta falla que se presentó a través de una cuña formada por la diaclasa “Roldán” y la foliación, donde ya se planteó una alternativa de restauración pero que continúa en ajuste el proceso constructivo. La bóveda de las cavernas se encontró en buen estado y no se presentó desprendimiento del sostenimiento ni desprendimientos de roca. En la caverna de transformadores se observaron desprendimientos de la primera capa de concreto lanzado pero no se observaron desprendimientos de roca. En la Almenara 2 se observó acumulación de material desde la parte inferior del sector norte hasta el costado sur, pero no se observó afectación del soporte, bóveda ni hastiales.

Sistema auxiliar de Desviación

La galería de acceso se encontró en buen estado y los trabajos de reforzamiento ejecutados fueron mínimos, respecto al soporte y la sección de excavación, la cámara de compuertas se encontró en buen estado, no se observaron desprendimientos del soporte ni desprendimientos de roca. Las compuertas fueron levantadas de su posición inicial aprox. 7 m por encima junto con los bloques de roca extraídos con el dragado, este levantamiento afectó los tableros de las compuertas y plataforma de ensamble de vástagos.

“Se realizó el cierre de la compuerta del ramal izquierdo con éxito, el pasado miércoles 29 de mayo, el Contratista está trabajando en la restauración de la compuerta del vano derecho. Los trabajos de dragado del vano derecho comenzarán la segunda semana de junio de 2019. De las 14 perforaciones Down - Boring desde la galería de construcción #3 hacia la cámara de compuertas de la DF, solo está pendiente la última perforación. Una vez terminadas las perforaciones, se procederá a realizar una inspección de 4 perforaciones mediante videos. Analizada la información del video de cada perforación, se procederá con más 14 etapas de vaciado de concreto Tremie. En el vano de la compuerta izquierda, se trabajará en la instalación de la tapa estanca y el sistema de By-Pass.”

Terminados los trabajos en la SAD y en la Descarga de Fondo (DF), se ingresará por el Túnel de Descarga 4 hasta las compuertas de la SAD y DF y se construirán los tapones definitivos según el diseño original.”

Desviación original

“se avanza en el diseño para el cierre definitivo, el cual estará conformado de la siguiente manera:

- *El PT2 se construirá por el arreglo de micro pilotes que serán instalados desde la descarga intermedia, los cuales atraviesan completamente el TDD de arriba hacia abajo, empotrándose en la roca una longitud tal que se genere la estabilidad del sistema.*
- *Estos micro pilotes estarán acompañados inyecciones de consolidación con mortero anti-deslave, resina y lechada de los sedimentos actualmente depositados en el lecho del TDD, en una longitud de 25 m.*
- *Para evitar la presurización del sistema durante la construcción del pre-tapón, aguas arriba de este se habilitará un “By-Pass” que conecta el TDD con la Descarga Intermedia, limitando de esta forma las presiones a un valor máximo estimado de 40 m.c.a. durante el proceso constructivo.*
- *Con el By-Pass habilitado, encima de los sedimentos ya consolidados se construirá un filtro granular mediante la inyección de gravas y arenas.*
- *El filtro disminuirá las velocidades del agua de manera importante y por consiguiente permitirá la consolidación de este mediante inyecciones.*
- *El filtro será retenido mecánicamente por los micro pilotes y un sistema de esferas de nylon que serán lanzadas previamente a través de tres pozos Down - Boring que se construirán especialmente para tal propósito.”*

Conducciones

Se realizó una modelación numérica para la evaluación de la estabilidad de la conducción, incluyendo sus efectos sobre la ladera arriba de las captaciones en la zona del deslizamiento “El Romerito”, los resultados indican que la zona de afectación muestra que la extensión de la zona plástica no se extiende hacia arriba de la misma, por lo anterior, los pozos bajo las condiciones actuales se encuentran estables y esta zona plástica no afecta la estabilidad de la ladera. La ladera presenta un factor de seguridad adecuado, aun modelando una zona de afectación que conecte la ladera con los pozos de conducción. El análisis de formación de cuñas en la zona de afectación arrojó factores de seguridad entre 1,1, y 1,4 para presiones de 2 m.c.a.

Respecto a las conducciones N°1 y N°2 se concluye que no hay problemas de estabilidad que pongan en riesgo los taludes de la margen derecha. El modelo numérico indica que es

poco probable que la oquedad se extienda, principalmente por la calidad del macizo en la zona.

Condición de estabilidad general

- La estabilidad general de la ladera en margen derecha es adecuada para la condición estática y pseudo-estática según criterios de diseño definidos. En ese sentido, afectaciones puntuales tales como la oquedad de los pozos norte 1 y 2 y la zona alterada del sur, no ponen en riesgo el desempeño global del macizo que soporta las obras principales del proyecto. No obstante, la minimización total de los riesgos a largo plazo implica que condiciones particulares tales como las mencionadas sean estabilizadas.
- La instrumentación muestra que la margen derecha del proyecto hidroeléctrico Ituango se mantiene estable, pese a algunas afectaciones identificadas durante contingencia. Esta condición se ha validado también a través de diferentes enfoques de análisis, según los criterios establecidos en el documento.
- Para las zonas puntualmente afectadas se requieren tratamientos que van desde el relleno de la oquedad norte, la consolidación de la zona de debilidad sur, hasta la finalización de los trabajos de estabilización de la parte alta de captaciones.
- Con la estabilización de los sitios críticos se eliminarán los riesgos originados en estos puntos por la operación del sistema por fuera de las condiciones de diseño, y como consecuencia de la contingencia ocurrida en finales de abril de 2018.

CONCLUSIONES

Las presentes conclusiones son el resultado de las observaciones de los informes más relevantes en donde se verifica mediante análisis Geológico la estabilidad del macizo rocoso y la capacidad de la roca de soportar los esfuerzos a los que ha estado sometida a través de la contingencia.

1. Definitivamente los informes de Integral son los más completos, fundamentados y presentan toda la información detallada acerca de las condiciones pre-contingencia y posteriores a esta, además del estado de la obra posterior a la inundación que fue inducida a Casa de Máquinas. Los demás informes, generalmente concluyen que el macizo se encuentra en mal estado, pero su base argumentativa es muy somera y pobre.
2. De acuerdo a los informes de Integral, se da a entender que el estado del macizo rocoso no es perfecto, ha presentado oquedades, grietas, deslizamientos en cuña e incluso se desprendió una gran parte del machón de roca entre Casa de Máquinas y Almenara 1, a pesar de esto, los estudios indican que las probabilidades de que el macizo falle son muy bajas; sin embargo, es necesario que se haga una serie de reparaciones en pro de evitar un desastre, las cuales todavía se encuentran en proceso.
3. Actualmente, los principales riesgos corresponden a la oquedad que se encuentra entre los pozos norte 1 y 2 y una zona de debilidad que podría llegar a conectarse en superficie con el deslizamiento "Romerito", los modelos y estudios han demostrado que estas afectaciones no ponen en riesgo el desempeño global del macizo que soporta toda la estructura, sin embargo la minimización de los riesgos únicamente será posible si se estabilizan estas condiciones.
4. De acuerdo a los GSI obtenidos en la zona en donde están ubicadas las obras del proyecto que son iguales o superiores a 60 GSI se puede concluir que las obras subterráneas realizadas están ubicadas sobre un volumen estable del macizo rocoso.
5. Las afectaciones presentadas por el deslizamiento Romerito ocurridas durante la contingencia corresponde a suelos residuales que afectan la zona de captación y que son producidos por el mismo proceso constructivo y por el desprendimiento de material suelto que se acelera debido a la temporada de lluvias.
6. Los deterioros presentados en las conducciones que van hacia casa de máquinas no revisten riesgo para el macizo rocoso debido a que la zona plástica no se expande más allá del deterioro presentado.
7. La utilización de casa de máquinas como salida de agua evacuando casi 1000 m³/s soportando las presiones resultantes no afecto en gran medida el macizo rocoso, solo se produjo afectaciones parciales a cada una de las obras destacando entre ellas las más graves como son la zona de almenaras, casa de máquinas de manera parcial y las conducciones en donde se presentaron oquedades y fracturamientos que son posibles de reparar mediante inyecciones y estructuras de amarre.