

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA CON MODELACIÓN NUMÉRICA EN MASAS GEOLÓGICAS DEL DESLIZAMIENTO “DERRUMBE 1” – COMPLEJO HIDROELÉCTRICO DEL MANTARO

HYDROGEOLOGICAL INTERPRETATION WITH NUMERICAL MODELING IN GEOLOGICAL MASSES OF THE “LANDSLIDE 1” SLIDING – MANTARO HYDROELECTRIC COMPLEX

César González Linares¹, Rubén Esaú Mogrovejo Gutiérrez² y Gisel Veliz Francia³

RESUMEN

Desde hace muy pocos años, se ha construido modelos matemáticos para evaluar los recursos hídricos. Con más o menos éxito, estos sistemas se han aprovechado para simular procesos de generación de escorrentía a partir de datos de climáticos. Además, se han utilizado para simular procesos hidroeléctricos mediante datos climáticos.

Casi todos estos sistemas planteaban modelos muy simples por dos motivos: (a) la escasa capacidad de cálculo de los equipos informáticos y (b) el desconocimiento de las características de la mayoría de las cuencas, lo que impedía plantear de manera distribuida la resolución del conjunto de las ecuaciones que describen los procesos implicados en el ciclo hidrológico. Por esta razón, la modelización de procesos hidrológicos se ha movido dentro de los modelos que denominan los agregados realizados con términos medios de los valores de los registros logrados. En el siguiente documento, se ha utilizado registros de varios años que han sido recogidos y ordenados sistemáticamente. Además, constituyen una oportunidad y valiosa herramienta para plantear un modelo numérico de carácter distribuido, con resultados extendidos y un error mínimo que se obtiene de la calibración inversa.

Palabras clave: Interpretación hidrogeológica; modelización numérica; masas geológicas, complejo hidroeléctrico del Mantaro.

ABSTRACT

Only a few years ago, mathematical models have been constructed to evaluate the water resources. These systems have been used to simulate surface and underground runoff generation processes, which were more or less successful. Said systems have also served to simulate hydroelectric processes from climate data.

Almost all these systems posed very simple models for two reasons: (a) due to the scarce calculation capacity of the computer equipment and (b) the lack of knowledge about the characteristics of the majority of the basins (lack of data), which impede to pose the resolution of the set of equations which describe the processes involved in the hydrological cycle. For that reason, the numerical modeling of the hydrological processes has been moved within the field of applied engineering with support of the values from the achieved or measured registers. In this document, measured and systematically ordered registers from several years have been used. Said registers constitute an opportunity and a valuable tool to pose a distributed numerical model with extended results and a minimum error obtained as a result of the reverse calibration.

Keywords: Hydrological interpretation; numeric modelling; geological masses; hydroelectric complex of Mantaro; Groundwater flow.

1 Docente y Director del Laboratorio Central de Hidráulica y Medio Ambiente – Universidad Ricardo Palma. <gonzalezlinares@gmail.com>

2 Departamento de Geología, Geotecnia y Riesgo Sísmico - Cesel Ingenieros. Docente de la Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Civil-URP. <rmogrovejo@cesel.com.pe>

3 Departamento de Geología, Geotecnia y Riesgo Sísmico - Cesel Ingenieros. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas – Ingeniería Civil. <gveliz@cesel.com.pe>

1. INTRODUCCIÓN

El río Mantaro forma parte de la hoya amazónica y tiene origen en el centro oriental de la sierra peruana. Asimismo, drena una cuenca de 36600 km² de extensión. En su desarrollo medio, se emplaza el embalse Tablachaca, cabecera de las CCHH del sistema Mantaro, que produce más del 30% de la energía que consume el país. De esta forma, se regula diariamente los RR.HH. para las Centrales SAM y RON del complejo del Mantaro y las del próximo, denominado La Guitarra.

Fisiográficamente, la cuenca brinda grandes saltos hidráulicos que pueden ser clasificados como muy importantes. Sin embargo, la geología superficial y estructural es muy inestable. Ambas pueden ser calificadas como riesgosas, que aumentan su peligrosidad por el exceso de la precipitación como efecto del cambio climático. Así, se constituyen como un reto para la ingeniería peruana.

La geología conforma laderas activas en riesgo de colapso. En la vecindad del embalse de CH SAM, se ha registrado lugares críticos de deslizamiento sobre el embalse y el curso fluvial. Entre ellos, se encuentra el denominado “Derrumbe 1”, emplazado en las cercanías de la cola de embalse sobre la margen derecha del valle encañonado del río Mantaro. De esa manera, conforma un escenario de masas geológicas que han merecido diversos estudios por más de treinta y tres años. Consecuentemente, se ha tomado medidas con estructuras especiales para el control de la escorrentía superficial, sub superficial y otros. La existencia de escurrimientos sub superficiales es difícil de conceptualizar, más aún cuando se producen precipitaciones inusuales sobre las laderas y la presencia de zonas de recarga (áreas agrícolas) que pueden desestabilizar las partes bajas al pie de los taludes (en la cola del embalse). En ese sentido, y con fines de entender el movimiento del fluido dentro del medio poroso, se realizó una modelación numérica que utiliza los datos de campo registrados in situ, lo cual facilita los ajustes de consistencia, sensibilidad, precisión y convergencia afinada, con la finalidad de lograr una simulación hidrogeológica cuasi-realista con apoyo de tecnología emergente. Finalmente, debe indicarse que la modelación realizada tiene fines netamente académicos para el curso de Taller de Obras Hidráulicas de la Universidad Ricardo Palma, que pertenece a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil.

El deslizamiento denominado “Derrumbe 1”, situado en la ladera derecha del río Mantaro, es un activo geológico masivo que manifiesta desplazamientos a través de puntos de control topográfico e instrumentación geotécnica desde 1984. Este evidencia desplazamientos hasta de 0,796 m y, en el año 2010, registró desplazamientos en el orden de 1,89 m (en la parte baja del deslizamiento). Este fenómeno de geodinámica se desarrolla desde las cotas, a 3500 msnm, hasta el cauce del río Mantaro, a 2 700 msnm.

El desarrollo geomorfológico originado por el levantamiento de los Andes está asociado al ciclo de erosión (ciclo de las rocas) del Valle-Cañón del río Mantaro. Durante el proceso geológico, se originaron deslizamientos, aluviones, socavamiento y profundización de cauces, entre otros.

La morfología actual de la zona de emplazamiento y del deslizamiento se caracteriza por tener una superficie ondulada irregular. Gracias a ella, se forman escalones y depresiones con inclinaciones entre 30° a 35° respecto al basamento rocoso en las escarpas formadas en ambas márgenes del río Mantaro. Estos se constituyen, principalmente, por pizarras, ocasionales horizontes de cuarcitas (D-e) finamente foliadas y buzamiento casi vertical. Así, en los límites superiores a medios del deslizamiento, hay afloramiento de rocas metamórficas perturbadas, fracturadas y meteorizadas (D-e-1). Estas rocas metamórficas están cubiertas por diferentes superficies y espesor, que son depósitos antiguos y recientes de coluviales de derrumbe (Q-c-1, Q-c-2, Q-c-3 y Q-c) y acumulación de aluviales (Q-al).

El movimiento del Derrumbe 1 ocurre a través de la cobertura de depósitos coluviales desplazados en diferentes etapas (tiempos geológicos), respecto al basamento de pizarras y cuarcitas. Las rocas metamórficas de la zona están replegadas y foliadas desde ángulos sub-verticales a verticales hacia las márgenes del río Mantaro, que por efecto de su rugosidad e irregularidades físicas, hace que el material coluvial tenga barreras de resistencia, lo cual disminuye su velocidad de traslación.

La reactivación de estas masas geológicas del denominado Derrumbe 1 normalmente ocurre en la época de lluvias (periodos húmedos y post húmedos), por efecto de la circulación de las aguas superficiales y subterráneas, las cuales confluyen en las partes bajas (zona de descarga). De esa manera, se inicia el movimiento del material de los finos de la cobertura, lo que ocasiona grietas, escarpas y pequeños deslizamientos de laderas con dirección a la cola del embalse. Esto afecta a los canales de drenaje existentes por efecto de rotura y caída de derrumbes superficiales de los taludes de corte que confluyen sobre estas estructuras.

2. OBJETIVOS

- Plantear el modelo conceptual y numérico hidrogeológico de aplicación al “Derrumbe 1” del Complejo Hidroeléctrico del Mantaro mediante elementos finitos.
- Identificar los mecanismos de recarga y descarga, así como identificar el campo de la red de vectores de flujo dentro de las masas geológicas interpretadas.
- Comparar la modelización conceptual y la simulación numérica.

3. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

La formulación del modelo conceptual se sustenta en el análisis y discretización de las variables recogidas como producto de la investigación directa (datos de SPT, DPL, calicatas, sondeos dinámicos), imágenes y ortofotos; y la investigación geofísica, inventario y monitoreo de fuentes de agua, afloramientos de agua, y nivel freático. Ello se complementa con los datos de los diecinueve puntos de control topográfico (PC) con años de registro discreto desde marzo de 1984 a mayo del 2011.

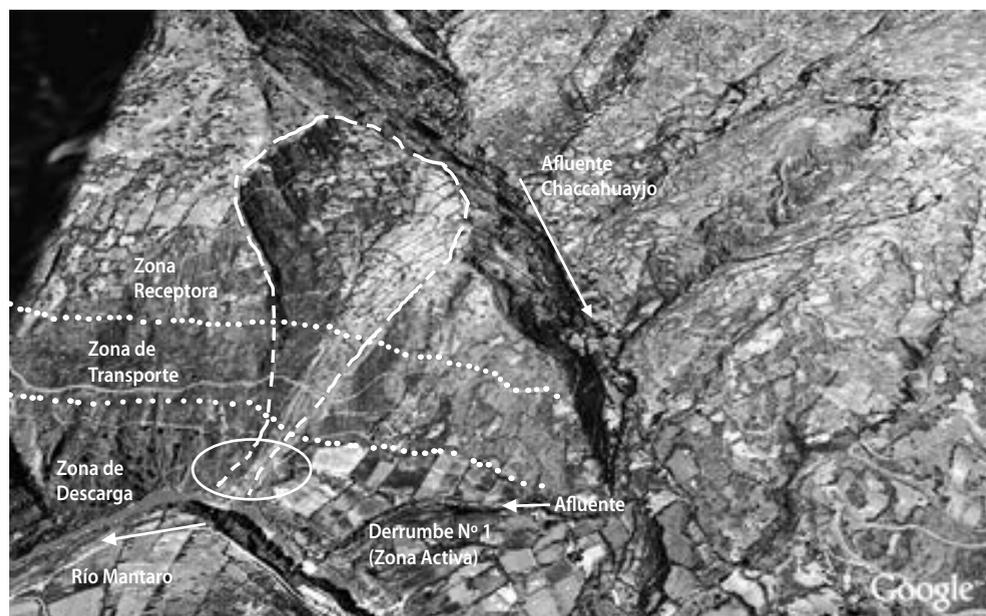


Figura 1. Vista 3D en que se aprecia la geomorfología local y los cursos de agua sobre la margen derecha del río Mantaro.

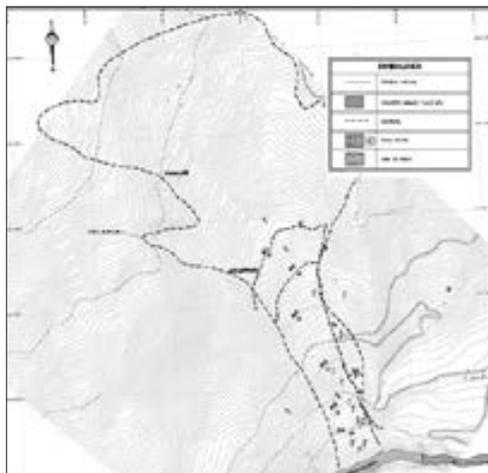


Figura 2. Curvas de niveles, gradientes del terreno, delimitación conceptual del área de aportes y ubicación de inventarios de fuentes de agua, y afloramientos diseminados.

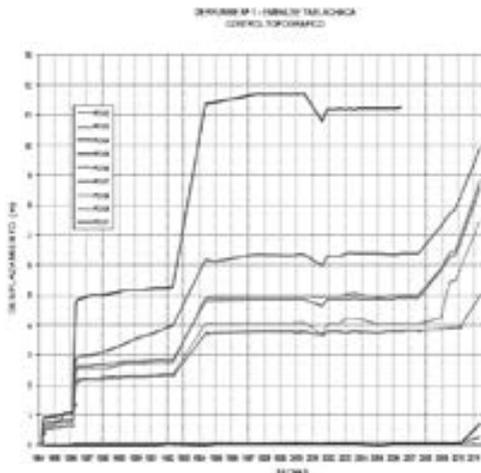


Figura 3. Obsérvese los asentamientos verticales anualizados de la topografía con PC ubicados en la zona activa (parte baja).

Los resultados en modelación conceptual extendida permitieron establecer las fronteras de superficies y la forma de las capas de los estratos (esto definió un volumen de control genérico o fronteras) que fueron llevados a una reproducción digital cuasi-tridimensional, como se aprecia en la figura 1 y siguientes.

TABLA 1
UBICACIÓN EN COORDENADAS DE AFLORAMIENTOS DE AGUA – INVENTARIO DEL AÑO 2011

FECHA	COORDENADAS UTM		COTA (msnm)	Q (l/s)	TIPO	OBSERVACIONES
	ESTE	NORTE				
07/07/2011	519165	8618111	2 778	0,28	Filtraciones	Flujo diseminado, descarga directamente a un canal
07/07/2011	519198	8618042	2 806	0,37	Filtraciones	Zona con humedad, más arriba, filtraciones de ladera.
07/07/2011	519166	8618111	2 778	0,40	Filtraciones	Flujo diseminado, descarga directamente a un canal
07/07/2011	519173	8618093	2 781	0,32	Filtraciones	Zona con humedad, más arriba, filtraciones de ladera.
07/07/2011	519239	8618021	2 811	1,50	Filtraciones	Zona con humedad, más arriba, filtraciones de ladera.
07/07/2011	519245	8617948	3 023	0,72	Filtraciones	Zona con humedad, más arriba, filtraciones de ladera.
07/07/2011	519157	8618176	2 761	0,34	Filtraciones	Zona con humedad, más arriba, filtraciones de ladera.

La zonificación de las masas geológicas se ha establecido, en forma conceptual, en función del mapeo geológico de detalle y las investigaciones geotécnicas. A continuación, se muestra un pla-

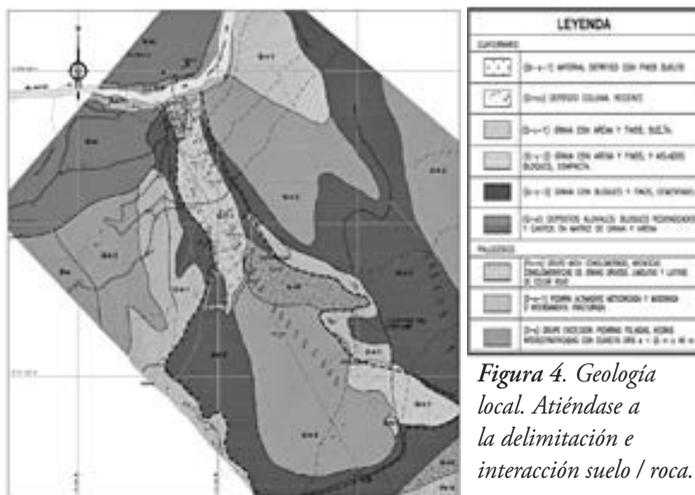


Figura 4. Geología local. Atiéndase a la delimitación e interacción suelo / roca.

la cresta de las escarpas. Estas últimas limitan los derrumbes antiguos y están muy alteradas y meteorizadas. La dirección e inclinación de la foliación de las pizarras es variable. Por ello, se ha determinado, principalmente, orientaciones norte-sur y noroeste-sureste, con buzamientos desde 10° hasta la vertical.

Los contornos superiores y medios del Derrumbe 1 son conformados por afloramientos de pizarras muy alteradas, fuertemente fracturadas y meteorizadas (D-e-1). Esto es resultado de asentamientos ocasionados por antiguos derrumbes.

b) Depósito coluvial reciente (Q-co)

Del mapeo de la geología local (figura 2), se puede inferir que estos materiales son del sector central del Derrumbe 1, entre las cotas de 3200 a 3000 msnm, aproximadamente, y forman un cono hacia las partes bajas. Respecto a su constitución, estas van desde bloques a gravas de pizarras con pocas cuarcitas angulosas a subangulosas, con poca matriz arena limosa. Este material reciente es producto de la caída y los derrumbes, desde las unidades (D-e-1) y (Q-c-3).

c) Coluvial (Q-c-1)

Es el material ubicado en la parte central longitudinal y la depresión que llega hasta cerca de la margen derecha del río Mantaro. Está formado por la masa deslizante activa. Todo ello constituye gravas angulosas y planas, que se mezclan con arena y pocos finos. Se encuentran sueltas, no plásticas, y en las partes húmedas.

Estos depósitos tienen dos sectores. Una, la parte media, que es estrangulada de la masa superior. Aquí, afloran inicialmente ojos de agua (afloramientos difusos) y bofedales por donde se producen los traslados recientes de poca magnitud. Estos han ocasionado desplazamientos y roturas

no geológico local con la delimitación de los materiales cuaternarios y la descripción del basamento rocoso:

a) Basamento rocoso

La zona de deslizamiento tiene basamento rocoso, que está constituido por pizarras negras muy foliadas e intercaladas en sectores con niveles delgados de limolitas y cuarcitas (D-e) que afloran en ambas márgenes del río Mantaro y en



Figura 5. Nótese el desplazamiento y corte de la brecha de separación del canal de concreto pobre afectado por el flujo.

de algunos tramos de los canales existentes para el drenaje superficial que se muestra en la foto siguiente.

La zona baja o inferior (Qr-c-1), en proceso de actividad, se inicia entre la rotura del canal de drenaje existente (brecha vertical de 0,80 m de ancho, al pie del PC-10). Esta zona presenta grietas, escarpas de derrumbes y descarga de los manantiales (afloramientos de agua) que drenan el volumen de agua infiltrada desde las partes altas (zona de recarga).

d) Coluvial (Q-c-2)

Constituido por materiales poco consolidados, no presenta actividad reciente. Está conformado por gravas angulosas y bloques aislados en matriz arenosa de pocos finos; es medianamente densa, no plástica, seca en su mayor parte con sectores húmedos y de color gris oscuro. La ubicación de este material está en la parte superior a media, con alta pendiente y permeabilidad media, sin movimiento reciente, no presenta grietas ni escarpas recientes de deslizamientos y está seco.

e) Coluvial (Q-c-3)

Conformados por gravas y bloques angulosos en forma de lascas, sumergidas en matriz arenosa con pocos finos, se encuentran densos a medianamente densos, no plásticos, secos a poco húmedos y de color gris a gris oscuro. No presenta actividad reciente y el espesor se estima en más de 10m. Se localiza bordeando los límites del Derrumbe 1. Su relieve tiene forma de lomadas, depresiones y pequeñas quebradas, que delimitan el área del Derrumbe 1, con escarpas de hasta 10 m de altura. Debido a

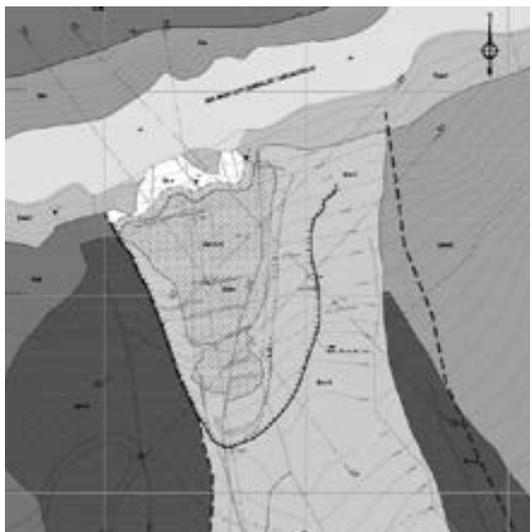


Figura 6. Vista en planta de la sección E-E, ubicada sobre la zona activa (sector inferior).

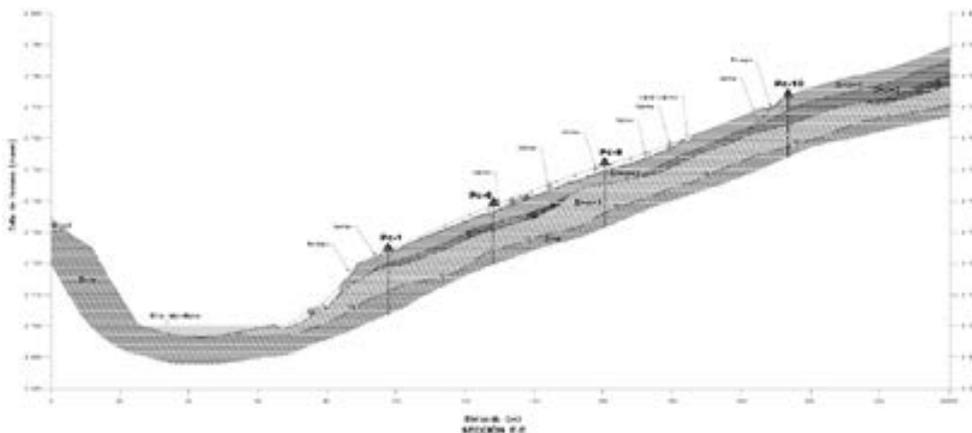


Figura 7. Vista en corte de la sección E-E. Obsérvese la ubicación de los puntos de control PC y la estratigrafía conceptualizada.

TABLA 2: VALORES TEÓRICOS DE PERMEABILIDAD DE ALGUNOS MATERIALES

TIPO DE MATERIAL	PERMEABILIDAD
	(Darcy)
Materiales no consolidados	
Grava	10^5-10^2
Arena limpia	$10^3-0.5$
Arena limosa	10^2-10^{-2}
Loess, limo	$10-10^{-4}$
Arcilla marina	$10^{-4}-10^{-7}$
Materiales consolidados	
Arenisca	$10^{-1}-10^{-5}$
Caliza y dolomita	$10^{-1}-10^{-4}$
Caliza cársica	10^3-10^{-1}
Pizarras y lutitas	$10^{-4}-10^{-8}$
Basalto fracturado	10^3-10^{-2}
Roca cristalina fracturada	$10-10^{-3}$
Roca cristalina densa	$10^{-5}-10^{-8}$

su morfología y permeabilidad, facilita la infiltración de aguas hacia las partes más bajas (zona de descarga).

f) Depósito Aluvial (Q-al)

Ubicado en las partes bajas en forma de altas terrazas antiguas con respecto al cauce actual del río Mantaro y modeladas por la quebrada Chacahuayo. Litológicamente, está conformada por bloques con gravas polimétricas y heterométricas, desde canteadas a sub redondeadas, en matriz areno limo arcillosa. El depósito es compacto a medianamente denso, no plástico, seco a moderadamente húmedo y de color beige. Presenta taludes verticales en los cortes naturales expuestos en el cañón del río o bordes del embalse del Mantaro. Estas terrazas actualmente son utilizadas por asentamientos humanos y agricultura (zonas de regadío).

4. PRESENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO Y SUPERFICIAL

El área de drenaje superficial, que abarca el Derrumbe 1, tiene una extensión de 0,74 km² y está comprendida entre las cotas 3540 y 2700 msnm. La escorrentía superficial se produce por dos factores: la precipitación pluvial y los afloramientos del agua subsuperficial en los sectores que se localizan en la zona media y baja del Derrumbe 1.

Del análisis hidrológico local, se estimaron las precipitaciones pluviales en la mencionada zona, las cuales alcanzan los 74,6 mm de lluvia máxima en 24 horas. El tiempo de retorno es de 190 años

TABLA 3: VALORES TEÓRICOS DE LA POROSIDAD EFICAZ DE ALGUNOS MATERIALES

TIPO DE MATERIAL	POROSIDAD
	(%)
Materiales no consolidados	
Grava gruesa	28-12
Grava media	32-13
Grava fina	34-21
Arena con grava	39-20
Arena gruesa	35-20
Arena media	39-15
Arena fina	43-10
Arcilla arenosa	12-3
Materiales consolidados	
Arenisca	5-30
Caliza y dolomía	0-40
Caliza cársica	0-40
Pizarras y lutitas	0-10
Basalto fracturado	5-50
Roca cristalina fracturada	0-10
Roca cristalina densa	0-5
Granito alterado	34-57

(tiempo de retorno seleccionado por consideraciones de riesgo alto), tal como se aprecia en la siguiente tabla.

TABLA 4: DATOS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS PARA EL ANÁLISIS HIDROLÓGICO

CÓDIGO	ESTACIÓN	ALTITUD (msnm)	PERIODO DE REGISTRO ANUAL	NORTE	ESTE
Sin código	Kichuas	2 550,00	1964/01/01 - 2003/12/31	-	-
PRD5BAJO	DSBAJO	2 758,63	1979103/16 - 2005/03/15	8 621 875,00	523 091,00
PRD5ALTO	DSALTO	2 948,04	1981111/05 - 2005/03/15	8 621 746,00	523 387,00

TABLA 5: PRECIPITACIÓN MÁX. DE 24 HORAS PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

Tiempo de retorno (años)	P _{MAX24} (mm)
5	39,7
10	46,7
20	53,4
25	55,5
50	62,0
100	68,6
190	74,6
390	81,5
500	84,0

En la parte superior izquierda del Derrumbe 1, aproximadamente en la cota 3 150 msnm, cerca de la trocha carrozable, se identificó el primer ojo de agua (afloramiento), sector por donde existe un canal de regadío, cultivos y población.

Se identificó, entre las cotas 3 040 msnm y 3 025 msnm, una zona de bofedales que se incrementa a partir de la cota 2875 msnm y es longitudinalmente próxima al canal de drenaje. De esta manera, se prolonga casi hasta la escarpa rocosa con el río.

Las aguas subterráneas son producto de la infiltración de aguas de lluvia durante los procesos

meteorológicos. Por efecto de las características y permeabilidad del terreno (coluvial), mantiene una dirección de flujo de escurrimiento desde las partes altas. Así, afloran en sectores como manantiales y se localizan cerca de las partes bajas del fondo del derrumbe (zona de descarga).

El nivel freático, ubicado entre depósitos coluviales y el basamento metamórfico, constituye el nivel del Derrumbe 1. En los puntos donde se identificaron los manantiales, al parecer, el basamento es superficial, como se aprecia en la siguiente figura.



Figura 8: Vista cuasi 3D panorámica del Derrumbe 1. Nótese la zona de recarga y descarga.

5. MODELAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

Condiciones de frontera, diseño de grilla y parámetros hidráulicos

Naturalmente, el área del estudio recibe un hidrograma de salida a tasa variable de la precipitación dentro de un ciclo hidrológico normal. Los picos mayores se presentan en los meses de enero, febrero y marzo; los menores, en el periodo de estiaje de junio, julio y agosto. Su importancia en la construcción del modelo se debe a la consideración de un hidrograma de salida como parte del proceso de infiltración como una función que se origina en las características del suelo, el grado de humedad (textura, forma) y la percolación. Esta última se sujeta a los parámetros hidráulicos del medio poroso, a través de los intersticios, la porosidad, la permeabilidad de los materiales y sus discontinuidades (en el caso del basamento rocoso), como fallas y diaclasas.

En el siguiente perfil longitudinal, se puede apreciar la caracterización del modelo numérico en elementos finitos con mallas no estructuradas tipo triángulo-triángulo, en función al modelo conceptual geológico interpretado (suelo/roca descritas anteriormente).

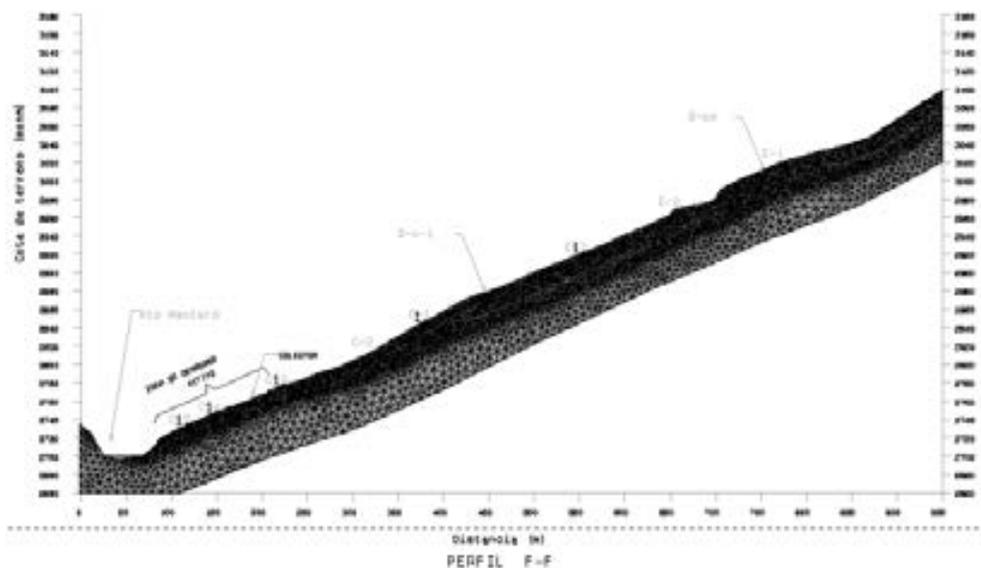


Figura 9: Perfil Longitudinal F-F discretizado en elementos finitos.

Para discretizar el proceso de infiltración, se establece que la condición de frontera inicial ocurre desde la superficie del terreno hacia los estratos inferiores (suelos o rocas). Por otro lado, para cada estrato indicado en la figura 9, no se ha considerado tasas de flujo regional, debido a que el borde superior del área de estudio coincide con la línea de parte de aguas de la cuenca y, además, en profundidad, se ubica el macizo rocoso, el cual representa un estrato impermeable, como se verifica en los trabajos de investigación geotécnica.

Calibración “Modelación inversa”

Las zonas geológicas implementadas en el modelo conceptual se han asumido como condiciones iniciales (véase la figura 9). Todos los aforos de los caudales (cf. tabla 1), estimados en los afloramientos de agua, han apoyado la calibración de los parámetros geo-hidráulicos para los estratos identificados en las zonas geológicas y las características del suelo superficial.

Para el proceso de calibración o modelación inversa, se han usado las series de lecturas de los caudales estimados in situ.

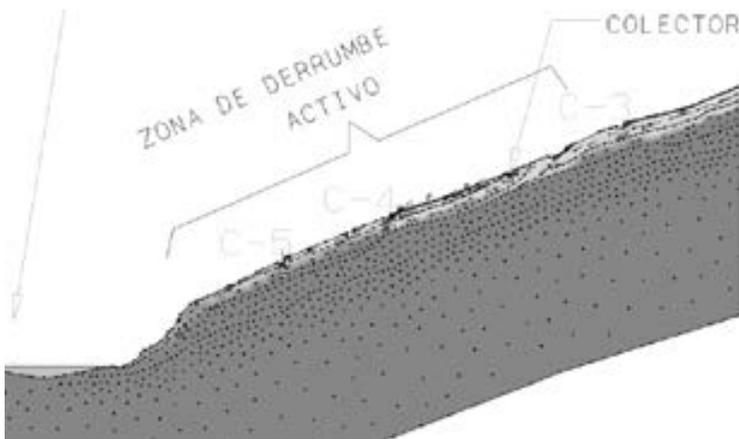


Figura 10: Obsérvense las zonas de descarga de flujo subsuperficial y la dirección de los vectores de flujo.

TABLA 6. COMPARACIONES OBSERVADAS VERSUS NUMÉRICAS DE LOS CAUDALES (ESTIMADOS IN SITU)

Puntos de observación	Cota con GPS descarga afloramiento	Caudal aforado (l/s)	Cota - FEFLOW descarga afloramiento	Caudal numérico (l/s)	Este (x)	Norte (y)	Ri (Qobs-Qnum)	Ri	Ri ^2
1	2 778,00	0,28	2 768,78	0,22	519 165,00	8 618 111,00	0,06	0,06	0,0036
2	2 806,00	0,37	2 810,20	0,31	519 198,00	8 618 042,00	0,06	0,06	0,0036
3	2 778,00	0,40	2 790,14	0,38	519 166,00	8 618 111,00	0,02	0,02	0,0004
4	2 781,00	0,32	2 750,24	0,45	519 173,00	8 618 093,00	-0,13	0,13	0,0169
5	2 811,00	1,50	2 810,53	1,35	519 239,00	8 618 021,00	0,15	0,15	0,0225
6	3 023,00	0,72	3 070,41	0,68	519 245,00	8 617 948,00	0,04	0,04	0,0016
7	2 761,00	0,34	2 730,10	0,30	519 157,00	8 618 176,00	0,04	0,04	0,0016

Nº puntos	7	7
Máximo	3 023,00	3 070,41
Mínimo	2 761,00	2 730,10
Diferencia	262,00	340,31

ARM (Absolute Residual Mean)	0,007
RMS (Root Mean Square)	0,084
RMS normalizado%	1,21%

De acuerdo a la tabla 3, se muestran los siete (07) puntos de afloramiento de agua y, dentro de los indicadores estadísticos utilizados como referencia para la calibración del modelo numérico, el NRMS (Error cuadrático Medio Normalizado) tiene un valor de 1,21%. Este, para fines del análisis efectuado, expresa aceptabilidad entre los valores observados que fueron confrontados con los estimados por el modelo numérico.

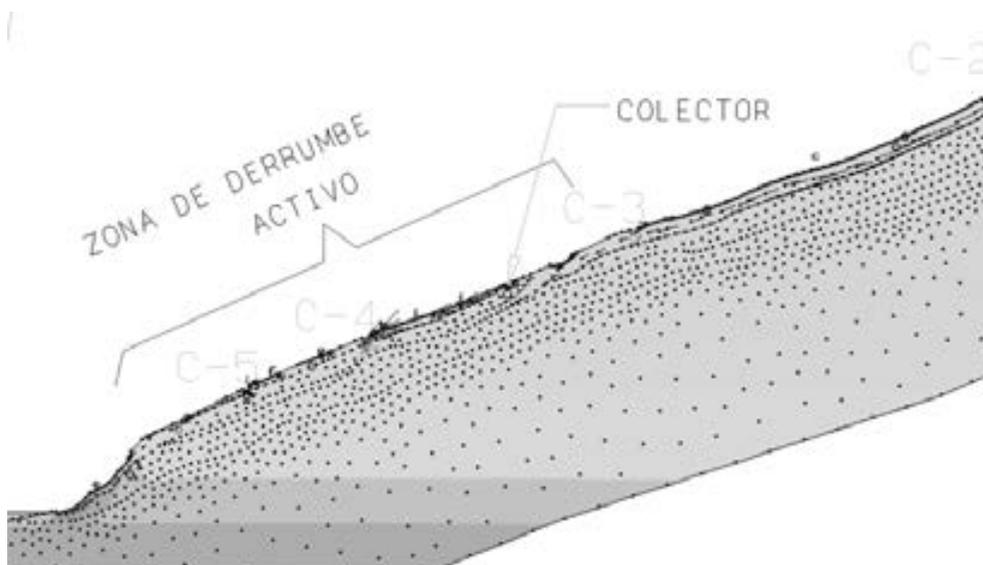


Figura 11: Vectores de flujo como resultado del movimiento del flujo subsuperficial.

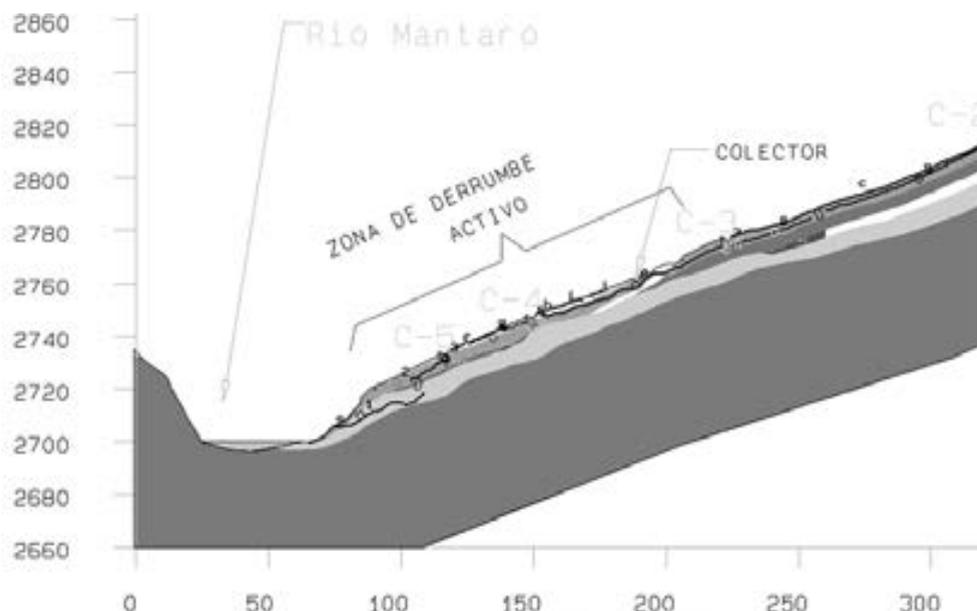


Figura 12: Abatimiento del nivel freático en la parte baja del Derrumbe 1.

6. CONCLUSIONES

- El modelo conceptual planteado es del tipo de agregados y considera valores medios representativos de cada variable disponible que fue recogida en campo durante varios años.
- La simulación numérica, con apoyo del código alemán Feflow, ha servido para simular el proceso de generación de escorrentía en el sector del Derrumbe N°1 a partir de los datos disponibles en la modelación conceptual en la forma de modelización distribuida que, en post proceso, fueron calibrados con los datos de campo entre las fronteras definidas en el modelo conceptual (tipo agregados). Además, se incluyó la geología, el acomodo de los estratos y las propiedades de estos, como granulometría, permeabilidad y caudales aforados en campo en los afloramientos.
- Se identificaron las condiciones de contorno de entrada y salida del área de la modelación. Asimismo, se asumieron las rugosidades; las permeabilidades, bajo los criterios de Manning y Darcy; los datos del hidrograma de salida; los mecanismos de recarga y descarga; y la identificación de la red de vectores de flujo dentro de las masas geológicas interpretadas conceptualmente.
- La Calibración y el análisis de comparación de los resultados entre la modelización conceptual y la simulación numérica permitió encontrar un NRMS (Error cuadrático medio normalizado) con un valor de 1,21 %, lo que expresa una gran aceptabilidad entre los valores observados y los estimados por el modelo numérico.

7. RECOMENDACIONES

- Continuar la implementación con mayor investigación directa e indirecta para mejorar la interpretación del modelo geológico, geotécnico e hidrogeológico, bajo escenarios de modelos distribuidos. Con ello, se puede lograr establecer simulaciones predictivas más cercanas a la realidad de

la naturaleza y seguir tomando datos de campo para mejorar la calibración del modelo conceptual de tipo de agregados a un modelo cuasi distribuido.

- La mayor parte de la recarga se realiza por infiltración a través del suelo del coluvial (superficie). Esto causa que se recarguen los estratos más profundos. Como resultado de esta recarga, se generan diversos puntos de afloramientos difusos de aguas superficiales ubicados en la parte media a baja del Derrumbe N°1. Ante ello, se sugiere establecer mecanismos para el drenaje superficial y subterráneo temprano con la finalidad de interceptar los vectores de flujo dentro de las masas geológicas, y reducir las cargas de agua al liberar de humedad y peso al derrumbe.

8. RECONOCIMIENTOS

- Departamento de geología, geotecnia y riesgo sísmico, Cesel S.A., www.cesel.com.pe
- Laboratorio Central de Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Ricardo Palma, www.urp.edu.pe.

9. REFERENCIAS

- Anderson, M.P. y Woessner, W.W. (1992). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport*. New York: Academic Press, Inc.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: American Elsevier.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea*. s/l: Omega.
- Domenico, P. A. y Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. s/l: John Wiley and sons.
- Driesch, H-J.G. (2009). *Feflow Manual*. s/l: s/e.
- Escuder, R. et. Al. (2009). *Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones FCIHS.
- Fetter, C. W. (1991). *Applied Hydrogeology* (4a ed.). New Jersey: Prentice-Hall.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall.
- González de Vallejo, J. (2002). *Ingeniería Geológica*. España: Prentice Hall.
- Hiscock, H. (2005) *Hydrogeology principles and practice*. Malden: Blackwell.
- Price, M. (1996). *Introducing groundwater*. Londres: Chapman & Hall.
- Price, M. (2003). *Agua Subterránea*. México: Limusa.
- Schwartz, F. W. y Zhang, H. (2003). *Fundamentals of Groundwater*. s/l: Wiley.
- Watson, I. y Burnett, D. (1995). *Hydrology: an environmental approach*. Boca Raton: Buchanan.
- Hydrogeologic manual*. Recuperado de <http://www.appliedhydrogeology.com>