

# Modelación numérica con el código FEFLOW-FMH3 para la Interpretación hidrogeológica en las masas geológicas del derrumbe 5 del talud derecho del embalse Tablachaca

Numerical modeling with FEFLOW code-FMH3 for hydrogeological interpretation in geological mass slope collapse 5 Tablachaca right reservoir

César González Linares,<sup>1</sup> Rubén Esaú Mogrovejo Gutiérrez,<sup>2</sup> Gisel Veliz Francia<sup>3</sup>

## Resumen

*El río Mantaro es parte de la gran hoya del Atlántico, geográficamente se ubica en la parte central de la sierra peruana dreña las aguas de una de las cuencas más importantes del país, con una superficie de 36 600 km<sup>2</sup>. En su parte media se encuentra el embalse Tablachaca, principal elemento de cabecera de las Centrales Hidroeléctricas del Mantaro, que producen poco más del 30% de la energía eléctrica que consume el país; regula en forma diaria y semanal la disponibilidad de los recursos hídricos para la generación de potencia y energía de las Centrales SAM y RON del Complejo Mantaro.*

*A pesar de la estratégica ubicación de la cuenca con saltos interesantes de niveles topográficos y la existencia de recursos hídricos, la geología regional es inestable, conformando laderas activas con riesgo de colapso; en el entorno de la ubicación del embalse se ha determinado varios lugares críticos que pueden originar derrumbes sobre el reservorio y el curso fluvial, el más preocupante por su cercanía a la presa es el denominado "derrumbe cinco" que ha merecido numerosos estudios por más de 30 años, en la actualidad ha sido reforzado para estabilizarlo con estructuras especiales, sin embargo la existencia de un flujo sub superficial desde la ladera hacia el reservorio ha servido para diseñar galerías filtrantes de drenaje, cuyos registros de aforos son datos importantes que han sirve para realizar una modelación matemática con datos reales que permiten realizar ajustes de consistencia, sensibilidad, precisión y la búsqueda de la convergencia.*

## Abstract

*The Mantaro River is part of the great basin of the Atlantic, is located geographically in the middle of the Peruvian highlands water drains a watershed in the country, with an area of 36 600 km<sup>2</sup>. In its middle is the dam Tablachaca, main header element of the Mantaro Hydroelectric, producing little more than 30% of electricity consumed in the country, governed by a daily and weekly availability of water resources for power generation and energy of Central and RON SAM Mantaro Complex.*

1 Laboratorio Central de Hidráulica y Medio Ambiente – Universidad Ricardo Palma

2 Departamento de Geología, Geotecnia y Riesgo Sísmico - Cesel Ingenieros

3 Departamento de Geología, Geotecnia y Riesgo Sísmico - Cesel Ingenieros - Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas – Ingeniería Civil

*Despite the strategic location of the basin with interesting jumps topographic levels and the existence of water resources, regional geology is unstable, forming active slopes at risk of collapse, in the vicinity of the location of the reservoir has been determined several spots that may cause landslides on the reservoir and the river course, the most troubling because of its proximity to the dam is the "collapse five" has won numerous studies for over 30 years, has now been reinforced with special structures to stabilize however the existence of a subsurface flow from the reservoir towards the slope has served to design drainage infiltration galleries, gauging whose records are important data that have served to make a mathematical model with actual data that allow for adjustments in consistency, sensitivity, accuracy and search convergence.*

## Introducción

El deslizamiento denominado Derrumbe 5 que ocupa la ladera derecha del río Mantaro es un activo que registra velocidades de 20 mm / año, su peligrosidad radica en su ubicación inmediatamente aguas arriba del estribo derecho de la presa Tablachaca. Este fenómeno geodinámico se desarrolla entre las cotas 3 300 msnm y el cauce del río Mantaro a 2 640 msnm comprometiendo una ladera de unos 800 m en dirección noroeste y en su centro con una longitud de 600 m en dirección NE-SO.

El basamento rocoso que limita la zona en estudio, está conformado por rocas metamórficas del grupo Excelsior y rocas meta sedimentarias del grupo Ambo de edad Paleozoica, esta litología está cubierta localmente por depósitos recientes del Cuaternario. En la parte superior y lado oeste, está limitado por rocas sedimentarias del Grupo Ambo (Ci-a) con metagrauwacas, metareniscas y filitas.

Por el Este, está limitado por rocas del grupo Excelsior, con unidades intercaladas de esquistos, cuarcitas y pizarras negruzcas, discordantes en la cota 3 075 msnm con rocas del grupo Ambo.

Por el Oeste la falla Oeste y, por el Este la falla Central, completan el patrón estructural. Entre el pie del deslizamiento (cota 3 100 msnm) y la parte central por encima de la cota 2 925 msnm está conformada por el depósito coluvial (Q-c) con potencia variable; por debajo de esta cota hasta el contrafuerte, se encuentra el paleoderrumbe (Qp-pd) con paquetes de roca metamórfica del grupo Excelsior, cubiertos parcialmente por depósito coluvial.

## Objetivos

- ✓ Simulación y discretización en modelo numérico hidrogeológico los parámetros geohidráulicos del derrumbe cinco mediante elementos finitos.
- ✓ Identificar los mecanismos de recarga y descarga, así como la red de vectores de flujo dentro de las masas geológicas interpretadas.
- ✓ Comparación de la modelización conceptual y la simulación numérica, mediante ajustes de precisión, estabilidad, sensibilidad y convergencia.

## Modelo conceptual hidrogeológico

En la formulación del modelo conceptual, se utilizó los datos de la investigación directa (sondeos diamantinos) y la investigación geofísica, en relación al monitoreo de la superficie de agua o nivel freático, que complementaron los datos de aproximadamente 70 piezómetros. Los resultados del análisis permitieron establecer las superficies para los estratos y llevarlos a una reproducción digital tridimensional como se aprecia en la Figura 1 y siguientes. La relación de los estratos y su capacidad de transmisibilidad hidráulica dentro del modelo geológico se detalla a continuación:

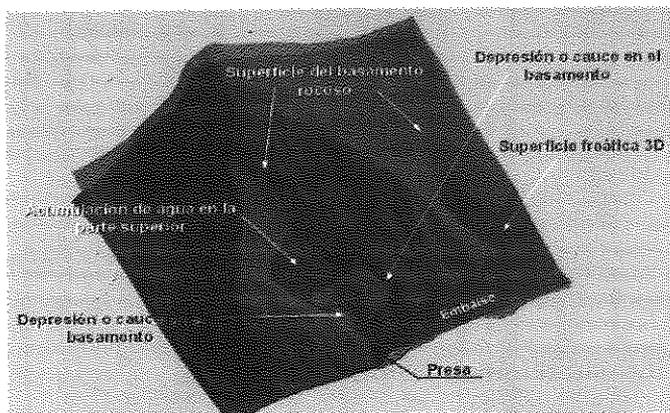


Figura 1, Vista 3D se aprecia la superficie de agua dentro del basamento rocoso.

### a) Zona 1 – Cuaternario Coluvial (Q-c). -

Con parámetros geo-hidráulicos estimados con la investigación directa e indirecta, como perforaciones diamantina y pruebas hidráulicas en suelo y roca, estimándose un espesor entre 10 a 77 m, con conductividad hidráulica promedio de  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  cm/s.

### b) Zona 2 – Cuaternario Paleoderrumbe (Qp-pd). -

Cuyos parámetros geo-hidráulicos de la permeabilidad con un rango de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  cm/s, y con espesores variable entre 8 m a 107 m.

### c) Zona 3 – Brecha de Pizarra (Qp-pd-b). -

Constituida por fragmentos de roca pizarra y cuarcita, los parámetros geo-hidráulicos para esta zona varía entre 12 y 80 m de espesor y con conductividad hidráulica promedio en el orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$  cm/s.

### d) Zona 4 – Basamento Rocoso (D-e). -

Constituido principalmente por pizarra carbonosa muy foliada (dura), ligeramente meteorizada rugosa, ligeramente oxidada en las paredes de las diaclasas y fracturas, de granulometría fina, de color gris, con un espesor que varía desde 80 a 100 m, y con conductividad hidráulica promedio inferida de la investigación geotécnica entre  $10^{-7}$  a  $10^{-9}$  cm/s.

La interpretación geológica, en relación a la hidrología del suelo (ver Figura 2 y Figura 3), se aprecia las zonas con mayor o menor índice de potencial de escorrentía superficial en el área en estudio y su respuesta ante un evento de precipitación con tiempo de retorno más de 100 años.

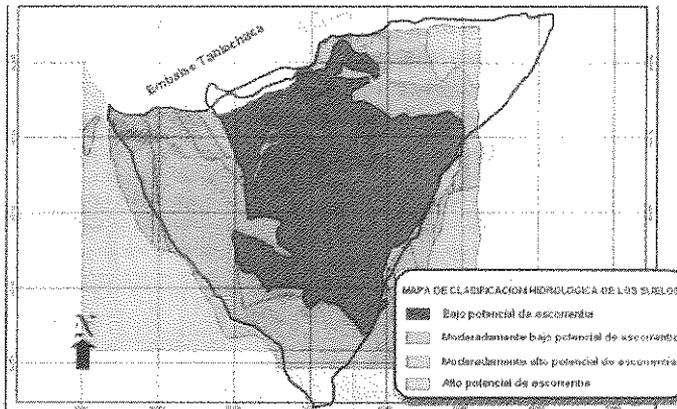


Figure 2, Clasificación hidrológica de los suelos en la zona en estudio.

## Presencia del flujo subterráneo y superficial

Las estaciones pluviométricas, se encuentran localizadas en el área en estudio y cerca del poblado de Kichuas.

La información pluviométrica existente (ver Tabla 2), reúne datos históricos de precipitación máxima diaria, con periodos de registro desde 1964 a 2001 y 2003 a 2005. Muestran valores:

$P_{\max 24\text{prom}}$  : 31.5 mm,  $P_{\max 24\text{max}}$  : 98 mm,  $P_{\max 24\text{min}}$  : 15 mm,

Los cuales han sido trabajados y analizados para un tiempo de retorno de 190 años, obteniéndose un rendimiento hídrico de  $12,92 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ .

La información pluviométrica existente, tiene datos históricos de máxima precipitación diaria, con periodos de registro desde 1964 a 2001 y 2003 a 2005.

Dentro del área en estudio existen más de 74 piezómetros, con extensómetros, inclinómetros, ubicadas en las galerías de drenaje los cuales registran descargas con valores de 5 a 7 ml/s.

Tabla 1, Datos de las estaciones meteorológica para el análisis hidrológico.

Código	Estación	Altitud	Periodo de registro	Norte	Este
None code	Kichuas	2 550,00	1964/01/01 - 2003/12/31	-	-
PRD5BAJO	D5BAJO	2 758,83	1979/10/3/16 - 2005/03/15	8 621 875,00	523 091,00
PRD5ALTO	D5ALTO	2 948,04	1981/11/05 - 2005/03/15	8 621 746,00	523 387,00

Tabla 2, Series de precipitación mensual para el área en estudio.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1964	25	43	71	54	42	0	0	3	43	49	71	101	501
1965	78	86	65	34	10	1	8	9	32	17	35	75	449
1966	69	79	60	36	21	1	0	11	19	73	97	99	544
1967	79	100	179	23	18	8	10	32	19	71	45	89	679
1968	65	84	62	20	4	2	9	14	16	40	82	102	483
1969	59	67	62	36	4	5	5	14	20	48	52	95	467
1970	171	69	73	47	13	5	11	1	33	54	32	59	601
1971	69	40	45	41	5	2	0	14	6	37	51	90	395
1972	83	46	69	61	5	0	0	0	10	27	50	82	436
1973	113	143	123	17	0	2	17	21	27	57	29	100	647
1974	144	164	91	39	2	20	0	20	0	40	23	24	571
1975	148	72	103	43	20	0	0	0	0	0	43	102	631
1976	99	72	68	26	10	12	4	0	42	17	22	52	444
1977	39	112	62	8	12	1	2	0	22	26	107	113	528
1978	191	103	69	30	9	7	1	1	60	34	46	82	593
1979	106	100	238	82	14	0	22	14	40	51	63	100	614
1980	112	161	228	28	22	1	16	16	65	194	56	83	936
1981	230	376	133	39	11	0	0	51	11	95	110	147	1204
1982	226	123	96	26	3	6	1	19	36	63	102	33	734
1983	62	59	72	35	6	19	2	16	47	43	51	77	489
1984	180	230	119	77	19	20	4	20	7	44	63	94	667
1985	121	83	67	63	16	7	0	9	46	46	60	128	666
1986	110	228	164	45	13	0	8	44	0	43	53	93	798
1987	92	70	44	32	34	4	10	1	38	41	88	97	520
1988	148	150	168	39	5	0	0	0	3	64	43	97	655
1989	77	99	182	94	14	27	0	8	17	98	30	52	672
1990	84	30	62	29	13	104	23	71	35	164	282	99	924
1991	110	0	59	30	9	30	9	12	13	33	183	35	521
1992	38	46	26	43	0	11	2	4	7	22	195	13	388
1993	101	64	41	29	12	8	5	4	16	188	286	60	776
1994	106	116	90	59	29	0	0	1	6	20	181	91	718
1995	73	128	112	16	9	13	1	8	33	28	47	28	618
1996	97	125	76	51	3	0	0	0	36	30	56	0	472
1997	112	111	74	69	12	1	0	22	36	30	79	50	695
1998	107	79	93	12	2	6	0	8	4	66	39	109	632
1999	92	101	72	43	6	3	12	2	56	29	79	66	659
2000	141	108	66	33	24	9	5	5	11	25	46	58	536
2001	111	67	64	26	28	1	14	10	21				381
2003	96	77	115	64	12	0	0	13	36	16	42	60	594
2004	52	135	106	27	18	13	18	8	25	52	49	993	667
2005	83	75	78										217
F PROMEDIO	103	109	95	29	13	9	6	13	26	52	77	89	600
MAXIMO	230	376	228	82	42	104	23	71	65	164	289	169	1204
MINIMO	25	0	26	0	0	0	0	0	0	0	22	0	217

## Modelamiento del flujo subterráneo

### Condiciones de frontera

Naturalmente el área del estudio registra una tasa variable para la precipitación dentro de un ciclo hidrológico normal, los valores mayores en los meses (enero, febrero y marzo), el periodo de estiaje en los meses de junio, julio, agosto. Su importancia en la construcción del modelo se debe al proceso de infiltración como función de fuente de origen de la hidrología del suelo y la percolación sujeta al medio poroso, a través de los intersticios del medio poroso para los materiales y sus discontinuidades, como fallas y diaclasas.

\* Dentro del perfil longitudinal siguiente, se puede apreciar la caracterización del modelo geológico interpretado (zonas 1, 2, 3 y 4).

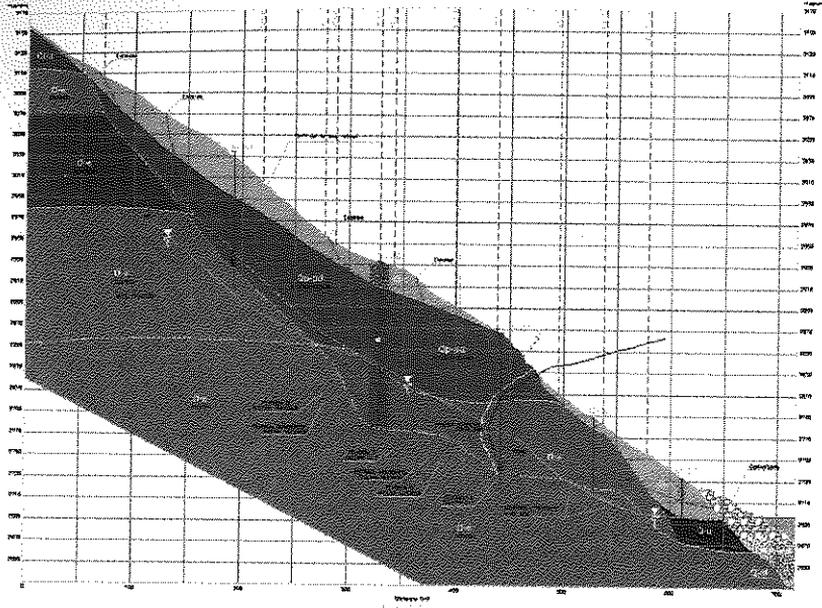


Figura 3, Perfil Longitudinal C-C

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 y/o rocas) para cada estrato indicado en la Figura 3, por otro lado, 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 que en profundidad se ubica el macizo rocoso el cual representa un estrato impermeable como verifican los trabajos de investigación directa.

En las Figuras 2 y 3, se observa el área de influencia directa, que cuenta con un bajo potencial de escorrentía, la mayor parte del agua de lluvia tiende a infiltrarse al no presentar vegetación y/o elementos de retención de estas aguas; contribuyendo directamente con la recarga del sistema concentrando este volumen de agua en la parte central o cuenco (ver Figura 1).

### Diseño de la grilla y estimación de parámetros hidráulicos

Culminada la discretización del modelo tridimensional, se identificó las secciones geológicas, hidrogeológicas, y geotécnicas para analizar los vectores de flujo mediante elementos finitos, estableciendo la hidrodinámica local para el flujo de agua subterránea dentro de las masas geológicas, y el análisis para conocer la red de flujo, debe indicarse que la modelación realizada tiene fines académicos para el curso de Taller de Obras Hidráulicas de la universidad.

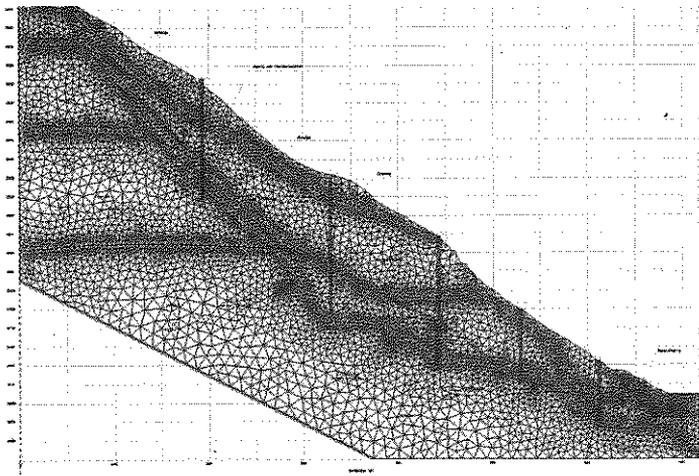


Figura 4, Perfil C-C discretizado dentro de una malla en elementos finitos.

### Calibración "Modelación Inversa"

Las zonas geológicas implementadas en el modelo conceptual, se han asumido como condiciones iniciales (Figura 4 y 5), todas las lecturas de los niveles de agua en más de 70 piezómetros instalados, nivel del agua del embalse, tasas de infiltración, las propiedades geo-hidráulicas 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 niveles de agua dentro de los piezómetros existentes, los cuales han sido comparados con la curva numérica versus con la curva del nivel freático monitoreada y registrada en campo.

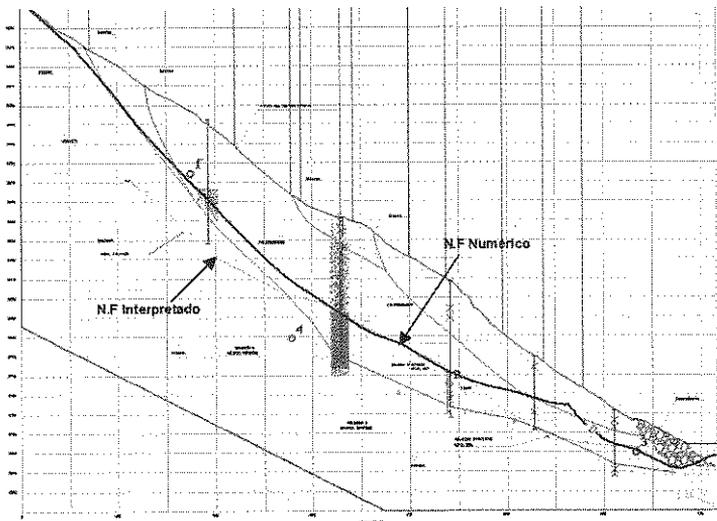


Figura 5, Perfil C-C, indicando la curva del nivel freático monitoreado confrontado con el numérico.

Tabla 3, Estadística de cargas hidráulicas observadas y calculadas numéricamente.

Puntos	Hc	Hm	Este (x)	Norte (y)	Ri (Hc-Hm)	Ri	Ri ^2
1	2,968.57	2,968.78	524,700.00	8,621,650.00	-0.21	0.21	0.04
2	2,910.10	2,910.20	524,750.00	8,621,600.00	-0.10	0.10	0.01
3	2,890.12	2,890.14	524,800.00	8,621,550.00	-0.02	0.02	0.00
4	2,850.25	2,850.24	524,850.00	8,621,500.00	0.01	0.01	0.00
5	2,810.51	2,810.53	524,950.00	8,621,500.00	-0.02	0.02	0.00
6	2,770.40	2,770.41	525,050.00	8,621,450.00	-0.01	0.01	0.00
7	2,730.22	2,730.10	525,100.00	8,621,400.00	0.12	0.12	0.01
8	2,710.22	2,710.80	525,150.00	8,621,400.00	-0.02	0.02	0.00
9	2,698.74	2,698.75	525,200.00	8,621,350.00	-0.01	0.01	0.00

N° puntos	9	9
Máximo	2,968.57	2,968.78
Mínimo	2,698.74	2,698.75
Diferencia	269.83	270.03

ARM (Absolute Residual Mean)	0.058
RMS (Root Mean Square)	0.088
RMS Normalizado%	0.03%

De acuerdo a la tabla 3, se muestran los nueve puntos evaluados (Perforaciones) y dentro de los indicadores estadísticos utilizados como referencia para la calibración o modelación inversa del modelo numérico el NRMS (Error cuadrático Medio Normalizado) tiene un valor de 0.03 %, el cual para fines del análisis efectuado, es un valor que expresa aceptabilidad entre los valores de carga hidráulica observados en campo confrontados con los estimados por el modelo numérico.

### Simulación 2D

El proceso de infiltración dentro del material para la zona en estudio, se inicia a través de material más permeable (coluvial) tal como se muestra en la Figura 6, esto sucede ante la presencia de estructuras tales como grietas, fracturas, fallas locales y grandes bolones de roca sin matriz y otras estructuras permeables.

En la zona de brecha, por su naturaleza arcillosa se aprecia un frente de flujo con menor incidencia que el material de cobertura debido a la permeabilidad más baja que de los coluviales y del paleo derrumbe; en la zona de contacto paleoderrumbe (parte superior) y la roca coluvial fracturada (parte inferior), el material de brecha está formado por fragmentos angulosos de roca desde tamaños de grava fina, en matriz areno-limosa y areno-arcillosa, con permeabilidad del orden de  $10^{-3}$  cm/s.

la permeabilidad obtenida con los ensayos in situ para el material de pizarra fracturada, indican un coeficiente de permeabilidad entre  $1,73 \times 10^{-3}$  y  $2,42 \times 10^{-7}$  cm/s, valores que pueden variar en función del comportamiento del nivel freático.

Por lo tanto, el flujo subterráneo con mayores tasas de descarga son incidentes sobre el material coluvial, que descarga o aflora al medio y al pie del talud en la zona de brecha, presentando mayor concentración de agua, bajo la simulación de lluvia extraordinaria en el área de estudio.

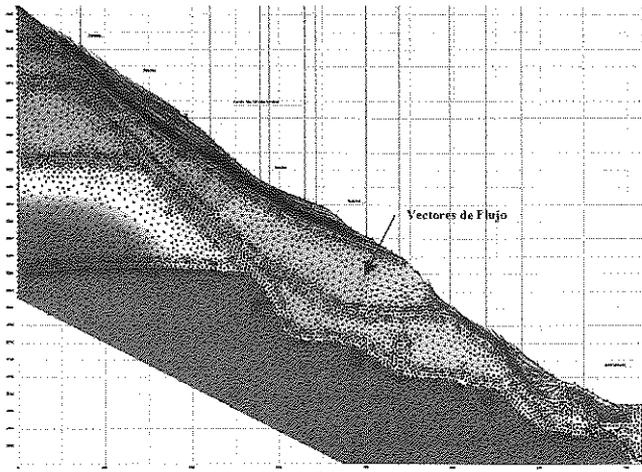


Figura 6, Perfil C-C, simulación de las redes de flujo.

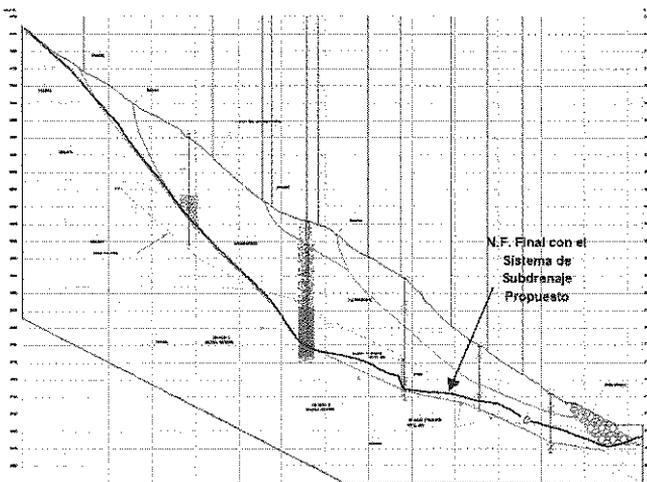


Figura 7, Perfil C-C, abatimiento del nivel freático simulado con subdrenaje profundo.

## CONCLUSIONES

- Continuar implementando el modelo geológico, geotécnico e hidrogeológico bajo un escenario de tridimensional, con fines de establecer simulaciones predictivas más acordes con las restricciones de la naturaleza, y seguir tomando datos de campo para calibrar el modelo 2D analizado.
- Establecer mecanismos para el drenaje superficial y subterráneo con la finalidad de interceptar los vectores de flujo dentro de las masas geológicas establecidas.

- La mayor parte de recarga es el suelo de coluvial (superficie) por el cual migra la mayor parte de la filtración, recargado los estratos más profundos y en función al gradiente hidráulico y las propiedades geo-hidráulicas para cada estrato interpretado en base a la investigación directa e indirecta.

## RECONOCIMIENTOS

- Departamento de geología, geotecnia y riesgo sísmico, Cesel S.A., [www.cesel.com.pe](http://www.cesel.com.pe)
- Laboratorio Central de Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Ricardo Palma, [www.urp.edu.pe](http://www.urp.edu.pe).
- MSc. Eng. Douglas Sarango Julca, Profesor Investigador de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, [www.unmsm.edu.pe](http://www.unmsm.edu.pe).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GONZÁLEZ DE VALLEJO, J., Ingeniería Geológica, Prentice Hall, España. 744 pp., 2002.
- BEAR, J., Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier, New York, 764 pp., 1972.
- FETTER, C. W., Applied Hydrogeology, Prentice-Hall, 4ª ed., 598 pp., 1991.
- FREEZE, R. A. Y J. A. CHERRY, Groundwater, Prentice-Hall, 604 pp., 1979.
- CUSTODIO, E. Y M. R. LLAMAS, Hidrología Subterránea., 2 tomos, Omega, 2350 pp, 1983.
- SCHWARTZ, F. W. & H. ZHANG., Fundamentals of Groundwater. Wiley, 592 pp., 2003.
- CURSO INTERNACIONAL DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA., Hidrogeología. Fundación Centro Internacional Hidrología Subterránea, 768 pp., 2009.
- HISCOCK, H., Hydrogeology principles and practice. Blackwell, 389 pp., 2005.
- WATSON, I. & BURNETT., Hydrology an environmental approach., 702 pp., 1995.
- DOMENICO, P. A. & SCHWARTZ, F. W., Physical and chemical hydrogeology., 502 pp., 1998.
- PRICE, M., Agua Subterránea., Limusa, 341 pp., 2003.
- CHAPMAN & HALL, Introducing groundwater., 278 pp., 1996.
- HYDROGEOLOGIC MANUAL, <http://www.appliedhydrogeology.com>.
- ANDERSON, M.P. AND W.W. WOESSNER., Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport., Academic Press, Inc. New York., 1992.
- FEFLOW MANUAL., H.-J.G. Diersch., Vol 1, 2, 3, 4 y 5., 2009.