

Angel Mamani Mayta<sup>1,2</sup> & Marcel Hürlimann Ziegler<sup>3</sup>

<sup>1</sup> SRK Consulting (Peru) S.A., Av. La Paz 1227 Miraflores, Lima, Perú (amamani@srk.com.pe)

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Lima, Perú (amamani@uni.edu.pe)

<sup>3</sup> Universidad Politécnica de Catalunya, Campus Nord c/J. Girona 1-3, Barcelona, España (marcel.hurlimann@upc.edu)

## RESUMEN

El deslizamiento superficial de tipo traslacional se encuentra al lado del pueblo Cercs, que pertenece a la región Berguedà de Cataluña; este deslizamiento tiene volumen aproximado de 250 m<sup>3</sup>, 12° de pendiente y la superficie de rotura se sitúa a 0.6 m de profundidad en roca altamente meteorizada.

La caracterización geológica se realizó mediante mapeo superficial y tres sondajes manuales, las cuales permitieron identificar tres estratos; coluvial, argilita alterada y argilita inalterada; la superficie de falla del deslizamiento se ubica en estrato de argilita alterada. También, se efectuó la caracterización geotécnica mediante ensayos de laboratorio, donde se realizó 10 análisis granulométrico y límites de Atterberg, 3 ensayos de permeabilidad por carga variable, 5 ensayos de corte directo y 1 corte anular.

En la zona de deslizamiento se cuenta con dos estaciones de monitoreo. La estación METEO registra precipitación, humedad relativa, temperatura del aire y presión atmosférica. La estación SLOPE registra datos geotécnicos, así como: la presión intersticial, contenido volumétrico de agua (VWC), succión, temperatura del suelo y desplazamiento horizontal. La auscultación de algunos instrumentos se realizó desde el año 2013. No obstante, en este artículo se considera los registros de monitoreo desde 2015 a 2019.

La modelación numérica acoplada Termo-Hidráulico (TH) se realizó para evaluar la interacción suelo-atmosfera; con el fin de obtener variables, así como: la temperatura del suelo, VWC y presión de líquido expresado en succión. Los resultados obtenidos con el modelo TH fueron satisfactorios en relación con los datos de monitoreo, en particular la temperatura del suelo y el VWC. Además, el modelo TH permite obtener los datos de presión del gas, presión de líquido y la succión de suelos parcialmente saturados. Estos parámetros fueron incorporados en el análisis de estabilidad en enfoque de talud infinito y finalmente para corroborar se realizó el análisis de estabilidad por la metodología de equilibrio límite. Ambas

metodologías obtienen factores de seguridad coherente y estas verificadas con la instrumentación.

## 1. Introducción

El cambio climático es causado por el calentamiento global, que está afectando a los patrones de lluvia en todo el mundo, originando numerosas ocurrencias de deslizamientos superficiales y profundos. Con mayor impacto en zonas tropicales que son más propensas a deslizamientos inducidos por las precipitaciones (Rahardjo et al., 2010).

Los deslizamientos superficiales en laderas ocurren generalmente por la infiltración producto de las precipitaciones de alta intensidad, las cuales generan el incremento de presión intersticial en medio poroso, provocando pérdida de resistencia en materiales poco consolidados (suelos), generando problemas de inestabilidad.

Por un lado, la configuración del relieve con pendientes que han permanecido estables durante muchos años puede fallar repentinamente debido a cambios en la geometría por erosión, formación de cárcavas, fuerzas externas y pérdidas de resistencia al corte (Abramson et al., 2002). También, la combinación de las precipitaciones intensas con pendiente elevada y las condiciones del suelo son factores críticos (Andrea et al., 2005).

El presente trabajo tiene por objetivo realizar el análisis geotécnico de un deslizamiento superficial ubicado en una ladera del poblado Cercs (municipio de Sant Jordi de Cercs). Para el cual, se realizaron varias actividades tales como: levantamiento topográfico a detalle, caracterización geológica y geotécnica, instrumentación geotécnica, modelación numérica entre la interacción suelo-atmosfera y análisis de estabilidad por equilibrio límite.

En la campaña de campo se realizaron las siguientes actividades: (1) levantamiento topográfico a través de un DRON de la marca DJI del modelo INSPIRE 2 equipado con una cámara X5S; (2) cartografía geológica para identificar los geo-materiales y geomorfología a una escala 1:500; (3) caracterización geotécnica mediante la obtención de muestras representativas de

cada estrato para ensayos de laboratorio tales como propiedades físicas, resistencia e hidráulica.

La instrumentación geotécnica y atmosférica ha sido fundamental en la zona de estudio, para entender el comportamiento del terreno y condiciones climáticas, el registro de datos se llevó a cabo desde 2013 a 2019. La monitorización en laderas inestables es una tarea fundamental para entender el comportamiento del terreno y sus mecanismos. Hürlimann et al., (2013) indica la auscultación de instrumentos tiene dos objetivos: (1) conocimiento científico y (2) la parte social, que es accionar de sistemas de alerta y alarma para mitigar los riesgos.

La modelación numérica Termo-Hidráulica (TH) se realizó con la finalidad de analizar la interacción entre suelo-atmosfera, para obtener variables tales como: la temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua y presión de líquido expresado en succión; estas variables serán incorporado en los análisis de estabilidad de la ladera. El modelo TH se desarrolló utilizando el código Code\_Bright (COupled DEformation of BRine Gas and Heat Transport) desarrollado por la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), y diseñado para el análisis de acoplamiento en problemas de termo-hidro-mecánico (THM) en medios geológicos (Olivella et al., 1994). El código Code\_Bright utiliza el interfaz del Software GiD para el preprocesamiento y post-procesamiento; este software GiD fue desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería (CIMNE).

El análisis de estabilidad del deslizamiento Cercs se realizó mediante la metodología de equilibrio límite (LEM) para obtener el factor de seguridad FS al deslizamiento, a través de la determinación del esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la superficie de falla y la comparación con la resistencia cortante del suelo. Para el análisis de estabilidad se utilizó el Software Slide 8.0 (Rocscience Inc, 2018). Adicionalmente, se realizó el análisis analítico mediante la definición de talud infinito, incluyendo a la formulación básica el parámetro de tensión mátrica y el grado de saturación del suelo, el cual fue planteado por Lu y Likos (2004) para suelos parcialmente saturados.

## 2. Ubicación y descripción del deslizamiento

### 2.1. Ubicación

Geográficamente la zona de estudio se encuentra situada en el Poblado de Sant Jordi en Cercs, perteneciente a la comarca de Berguedà, provincia de Barcelona (Ver Figura 1). Es accesible por una vía terrestre desde la ciudad de Barcelona-Berga-San Jordi de Cercs y viceversa.

El cuerpo del deslizamiento se sitúa exactamente en la ladera que está en el margen izquierdo del río

Peguera, que drena hacia la presa de Baells; y unos 600 metros desde el municipio de Sant Jordi de Cercs, en dirección hacia el Sur.

**Figura 1**

*Ubicación de la zona de estudio*



**Nota:** Mapa obtenido, Instituto cartográfico y geológico de Catalunya (ICGC).

**Fuente:** <http://srv.icgc.cat/vissir/index.html?zoom=6&centerRnd=true>

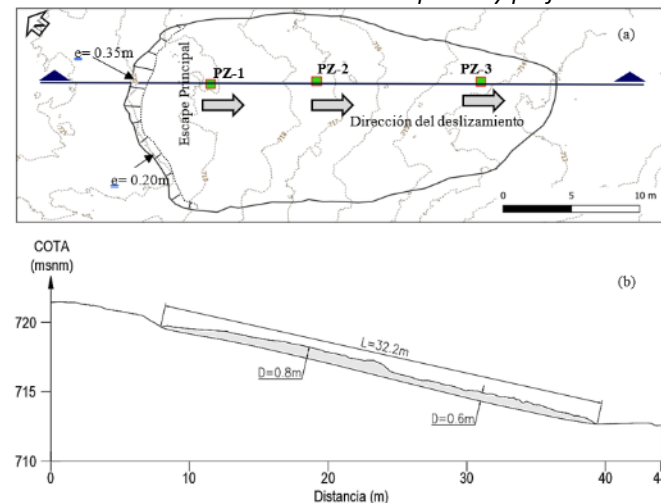
### 2.1. Descripción del deslizamiento

El deslizamiento de Cercs está situado en una ladera con baja pendiente que varía de 10 a 15 grados y la dirección del deslizamiento tiene 135 grados de azimut. La superficie de falla se encuentra entre 0.6 a 0.8 m de profundidad respecto a la superficie del terreno. El ancho máximo de la masa deslizada es de 15 m y la longitud máxima de 32.2 m en dirección sureste; como se aprecia en la Figura 2(a). Además, en la cabecera del deslizamiento existe un escarpe principal con saltos de 0.20 y 0.35 m.

El deslizamiento superficial de Cercs es clasificado de tipo traslacional bajo el criterio de Skempton y Hutchison (1969). Este criterio consiste en una relación entre el espesor (D) y la longitud máxima de superficie de falla (L), el resultante debe ser menor a 0.10 en unidades adimensionales. Para el deslizamiento de Cercs la relación entre D/L es igual a 0.025.

**Figura 2**

*Geometría del deslizamiento Cercs en planta y perfil*



**Nota:** (a) Vista en planta del cuerpo del deslizamiento; (b) Sección típica del deslizamiento que se considera en los análisis.

### 3. Caracterización geológica y geotécnica

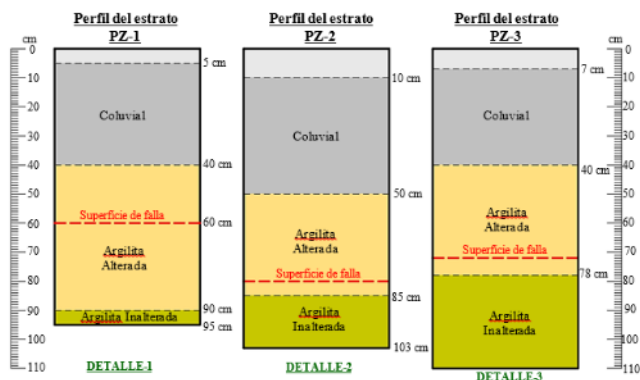
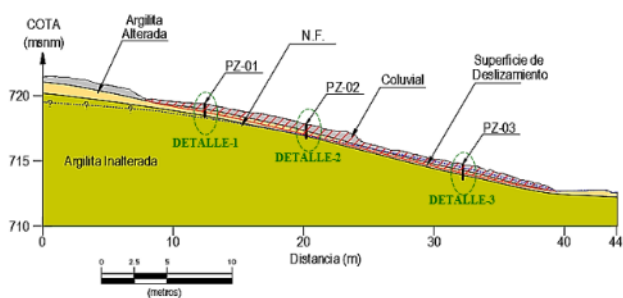
#### 3.1. Geología

En la zona de estudio aflora secuencia deposicional de lutitas del Permo-Triásico, arcillas y calizas del Keuper en las facies Garumniense del Cretáceo Superior, con intercalación de lutitas, areniscas rojas con niveles de lignitos y yeso; superficialmente cubierta por depósitos coluviales y derrubios (ICGC, 2018).

Para elaborar el modelo geológico en la zona de deslizamiento se caracterizó mediante 3 sondajes manuales (PZ-1, PZ-2 y PZ-3); con el fin de identificar los horizontes principales como: coluvial que se encuentra superficialmente con 40 cm de espesor; seguido por una capa de argilita alterada de 40 a 50 cm de espesor, en esta capa se encuentra la superficie de falla a 60 cm de profundidad aproximadamente. Finalmente, seguido por argilita inalterada de la secuencia deposicional de la facie Garumniense del Cretáceo Superior (Ver Figura 3).

**Figura 3**

Modelo geológico del deslizamiento en Cercs



**Nota:** PZ-01, PZ-02 y PZ-03 son perforaciones manuales, el área del deslizamiento resaltada con trama de color rojo en la sección geológica.

#### 3.2. Caracterización geotécnica

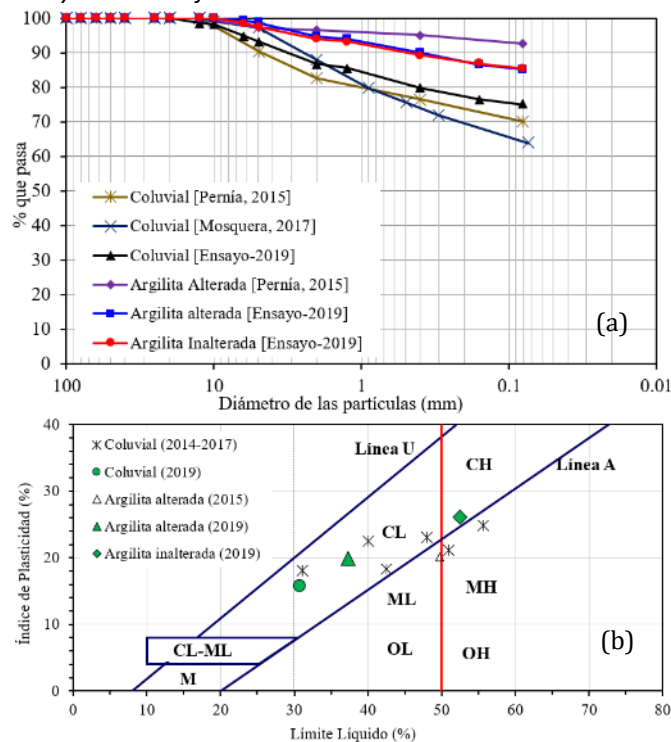
##### 3.2.1. Ensayos de identificación

Para caracterizar los materiales que conforman el deslizamiento, se ha realizado 10 ensayos de análisis granulométrico y límites de Atterberg; distribuido en tres estratos (Ver Figura 3). La clasificación de suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para cada estrato resultaron de la siguiente manera: para coluvial, arcilla inorgánica (CL), límite líquido (LL) de 30 a 50%, índice de plasticidad (IP) de 13 a 30%; para el estrato de argilita alterada se clasifica como arcilla inorgánica de plasticidad baja (CL), LL de

38 a 50%. IP de 18 a 30%; y para la argilita inalterada se clasifica como arcilla inorgánica de plasticidad alta (CH), LL de 53% y IP de 29 (Ver Figura 4).

**Figura 4**

Ensayos de identificación obtenidas en laboratorio



**Nota:** (a) Análisis granulométrico – material granular; (b) Clasificación de suelos finos de acuerdo a la Carta Casagrande.

##### 3.2.2. Ensayos de corte directo

Se realizó 5 ensayos de corte directo y 1 ensayo de corte anular, para determinar los parámetros resistentes en término de cohesión y ángulo de fricción. Los ensayos se realizaron el estrato coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. La superficie de falla del deslizamiento se encuentra en el estrato de argilita alterada, en donde se realizaron 4 ensayos de corte directo para obtener cohesión y el ángulo de fricción residual.

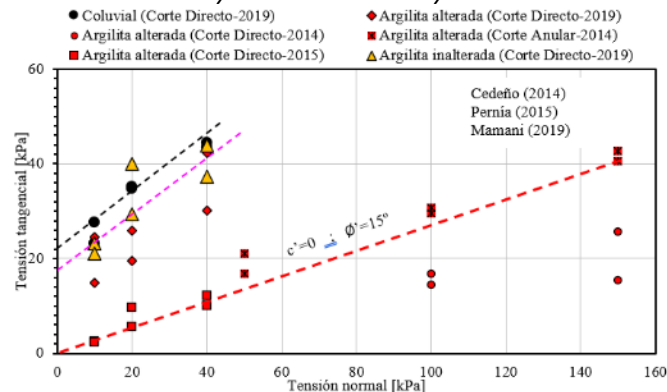
Los resultados obtenidos a través de ensayos de corte directo se presentan en la Figura 5 en función de tensión normal y tensión cortante (tangencial); con la intención de obtener los valores representativos de la cohesión y el ángulo de fricción para cada estrato (horizonte) de suelo identificado en la zona del deslizamiento. Para el estrato coluvial la cohesión varía de 22.3 a 18.7 kPa y el ángulo de fricción promedio es de 32 grados; para el estrato de argilita alterada donde se encuentra la superficie de falla la cohesión es nula y el ángulo de fricción residual es 15 grados; y para el estrato argilita inalterada la cohesión resulta de 16.9 kPa y el ángulo de fricción residual 28 grados.

Los parámetros de resistencia obtenido en la zona de estudio, es similar a las argilitas del deslizamiento Vallcebre (España), donde resultaron la cohesión variable de 0 a 16 kPa y el ángulo de fricción de 15 a 33

grados, en la superficie de falla fue asignada cohesión nula y el ángulo de fricción residual representativo de 15 grados (Corominas et al., 2005). Mientras en las argilitas del deslizamiento La Riba se determinaron la cohesión de 4.5 kPa y el ángulo de fricción residual de 28 grados (Alonso y Pinyol, 2007).

**Figura 5**

Resultados de ensayos de corte directo y corte anular



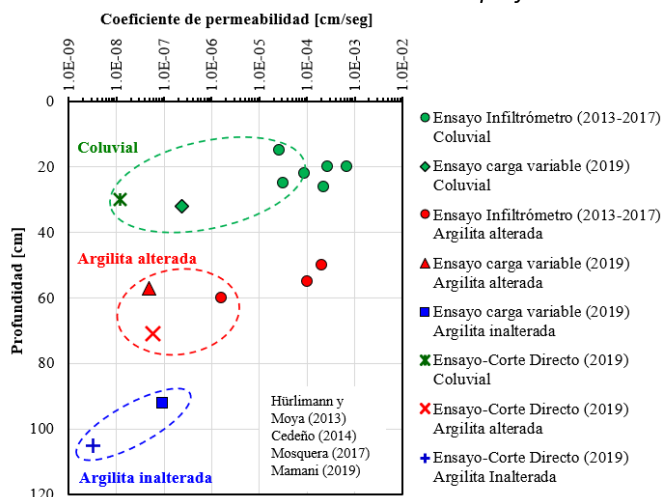
**Nota:**  $c'$  cohesión residual,  $\phi'$  ángulo de fricción residual. Los ensayos se realizaron en diferentes campañas 2014, 2015 y 2019.

### 3.2.3. Ensayos de conductibilidad hidráulica

Para determinar la conductividad hidráulica de cada estrato del suelo, se realizó ensayos in-situ utilizando el infiltrómetro minidisco y ensayos de laboratorio, donde se realizaron ensayos de permeabilidad por carga variable y la estimación de permeabilidad a partir de ensayo de corte directo de la etapa de consolidación de la muestra. Los resultados del coeficiente de permeabilidad respecto a la profundidad de cada estrato se muestran en la Figura 6. En el estrato coluvial existe variabilidad en conductividad hidráulica; en consecuencia, se deduce que los ensayos de campo pueden estar sujetas a algunos errores. En tal sentido, los resultados de laboratorio tienen mejor representatividad. Para asignar los parámetros hidráulicos a cada estrato se consideró el valor medio de los resultados de laboratorio.

**Figura 6**

Resultados de conductividad hidráulica vs a la profundidad



**Nota:** Los ensayos se realizaron en diferentes campañas 2013, 2017 y 2019.

La conductividad hidráulica no es un parámetro intrínseco que representa la característica del suelo (medio poroso), sino también depende de la viscosidad y el peso específico. Para obtener la permeabilidad intrínseca se utilizó la formulación de Sanchez (2011), y se define de la siguiente manera.

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (\text{Ec-1})$$

Donde:  $K$  es conductividad hidráulica,  $k$  permeabilidad intrínseca,  $\rho$  densidad del fluido,  $g$  aceleración de la gravedad y  $\mu$  viscosidad dinámica del fluido, para 20°C se considera 0.001 Pa.s.

En la Tabla 1, se muestra los resultados de conductividad hidráulica y la permeabilidad intrínseca de cada estrato.

**Tabla 1**

Conductividad hidráulica y permeabilidad intrínseca

Estrato	Conductividad hidráulica K (cm/seg)	Conductividad hidráulica K (m/seg)	Permeabilidad intrínseca k (m <sup>2</sup> )
Coluvial	2.91E-06	2.91E-08	2.97E-15
Argilita alterada	5.65E-07	5.65E-09	5.76E-16
Argilita inalterada	4.74E-08	4.74E-10	9.34E-17

**Nota:**  $\rho g = 9806 \text{ N/m}^3$ ,  $\mu = 0.001 \text{ Pa.s}$ .

$K$  conductividad hidráulica,  $k$  permeabilidad intrínseca.

## 4. Instrumentación y monitoreo

### 4.1. Instrumentación

El lugar de estudio se cuenta con dos estaciones de monitoreo llamado METEO y SLOPE. La estación METEO registra los datos meteorológicos como: precipitación, humedad relativa, temperatura del aire y presión atmosférica. Mientras, la estación SLOPE registra datos geotécnicos, así como: la presión intersticial, contenido volumétrico de agua, succión, temperatura del suelo y desplazamiento horizontal. En la Tabla 2, se detalla los equipos de monitoreo atmosférico y sensores geotécnicos auscultados de la zona de deslizamiento.

**Tabla 2**

Resumen del sistema de instrumentación en Cercs

Estación	Tipo de equipos.	Cantidad	Marca y modelo.
METEO	Pluviómetro	1	Decagon ECRN-100
	Sensor de temperatura y humedad relativa del aire	1	Campbell Scientific HC2S3.
	Barómetro	1	Bosch BMP085
	Piezómetro de cuerda vibrante.	3	Geosense VWP-3200
SLOPE	Extensómetro Horizontal.	1	ASM WS12-3000
	Sonda de humedad 10HS	3	Decagon 10HS
	Sensor de potencial de agua (Succión) y	2	Decagon MPS-2



temperatura.

**Nota:** METEO estación meteorológica y SLOPE estación geotécnica en la zona de estudio.

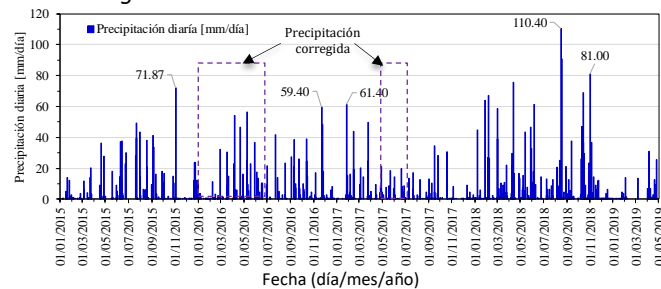
## 4.2. Monitorización

### 4.2.1. Precipitación

El registro de la precipitación pluvial se realizó con frecuencia de medida cada 5 minutos. Para el presente trabajo se consideró la información pluviométrica desde enero del 2015 hasta abril del año 2019. Las precipitaciones acumuladas por año resultaron de; 1023.27 mm/año (2015), 1097.27 mm/año (2016), 754.67 mm/año (2017) y 1872.60 mm/año (2018). La precipitación registrada con racha más alta fue de 110.40 mm/día ocurrido el 16 de agosto. En la Figura 7 se muestra la precipitación de 2015 a 2019.

**Figura 7**

Registro de precipitaciones pluviales de la estación meteorológica METEO 2015-2019



**Nota:** Precipitación corregida significa que ha sido completada a partir de otras estaciones meteorológicas cercanas.

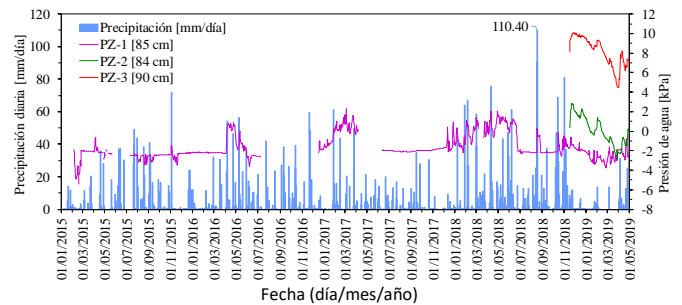
### 4.2.2. Piezómetros

En el cuerpo del deslizamiento se encuentra auscultada 3 piezómetros (PZ-1, PZ-2 y PZ-3) de cuerda vibrante, con la finalidad de medir la presión de poros en el subsuelo, la frecuencia de medida efectuada cada 15 minutos. El piezómetro PZ-1 registra información desde el año 2013 hasta abril del 2019; mientras, los piezómetros PZ-2 y PZ-3 registran desde el noviembre del 2018 hasta abril del 2019.

Los datos del piezómetro PZ-1, muestran la variación de presión de poros de -5.41 a 2.30 kPa entre el periodo de 2015 a 2019; en su mayoría registrando valores negativos (succión), además se interpreta que en la cabecera del deslizamiento el nivel freático se encuentra por debajo del piezómetro. Sin embargo, en los piezómetros PZ-2 y PZ-3 si registraron presiones intersticiales (Ver Figura 8).

**Figura 8**

Registro de presión de agua de los piezómetros durante el periodo 2015-2019



**Nota:** PZ-1, PZ-2 y PZ-3 piezómetros de cuerda vibrante auscultado en el cuerpo del deslizamiento Cercs.

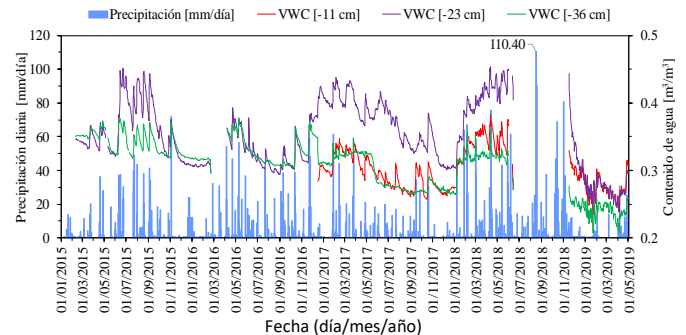
### 4.2.3. Contenido volumétrico de agua

Para medir el contenido volumétrico de agua en el cuerpo del deslizamiento, se ha auscultado tres sensores 10HS ubicadas a 11, 23 y 36 cm de profundidad. Los sensores ubicados en profundidades de 23 y 36 cm tienen registro desde 2015 a 2019, mientras el sensor ubicado a 23 cm de profundidad tiene registro de datos desde 2017 a 2019.

El registro de contenido volumétrico de agua muestra notoriamente la relación directa que existe con las precipitaciones pluviales; es decir, cuando la precipitación diaria supera los 20 mm/día refleja incrementos en el contenido volumétrico de agua, mientras la precipitación es baja también disminuye el contenido volumétrico de agua. (Ver Figura 9)

**Figura 9**

Registro de contenido volumétrico de agua (VWC) 2015 a 2019



**Nota:** VWC (-11 cm) sensor 10HS auscultado a 11 cm de profundidad, VWC (-23 cm) sensor 10HS auscultado a 23 cm de profundidad, VWC (-36 cm) sensor 10HS auscultado a 36 cm de profundidad.

### 4.2.4. Potencial hídrico (Succión)

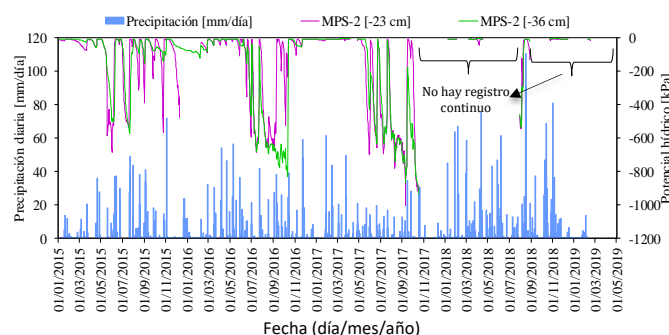
En ingeniería se utiliza el termino de succión en lugar de potencial hídrico del suelo. En la zona de estudio se ha auscultado 2 sensores de MPS-2 ubicado en la cabecera del deslizamiento a profundidades de 23 y 36 cm respectivamente. Los sensores se han auscultado desde el año 2013, en el presente trabajo se considera registro de datos desde 2015 a 2019 (Ver Figura 10). No obstante, en los años 2018 y 2019 los registros no son continuos, debido a daños en los sensores.

Los registros de succión muestran que existe una relación directa con las precipitaciones pluviales; es decir, cuando presenta lluvias con intensidades mayores a 20 mm/día existe proceso de infiltración por ende aumenta el contenido de agua en el suelo y la

succión disminuye; sin embargo, cuando no hay presencia de lluvias la succión incrementa alcanzando valores de 600 a 700 kPa.

También, se ha observado los cambios de humedecimiento y secado en el suelo ocurren de forma rápida superficialmente, mientras en profundidad las fluctuaciones de succión son menores. Esta diferencia se ha observado con los sensores que se encuentran ubicadas a 23 cm y 36 cm de profundidad.

**Figura 10**  
Registro de potencial hídrico (succión) de 2015 a 2019

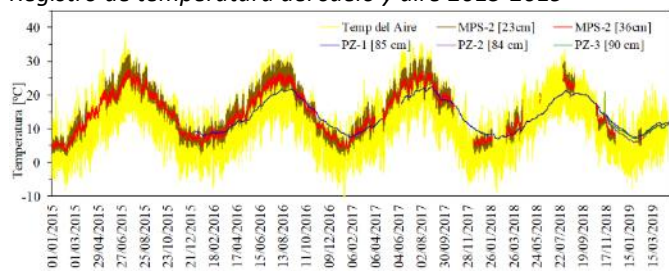


**Nota:** MPS-2 (-23 cm) sensor auscultado a 23 cm de profundidad, MPS-2 (-36 cm) sensor auscultado a 36 cm de profundidad.

#### 4.2.5. Temperatura del aire y temperatura del suelo

El registro de la temperatura del aire se realizó con el sensor Campbell Scientific HC2S3 con frecuencia de medida cada 15 minutos. Mientras, la medida de la temperatura en el suelo se llevó a cabo con los sensores piezométricos (PZ-1, PZ-2, PZ-3) y sensores de MPS-2 (23 y 36 cm de profundidad). Los resultados se muestran en la Figura 11.

**Figura 11**  
Registro de temperatura del suelo y aire 2015-2019



**Nota:** El color amarillo representa a la temperatura del aire. Los demás a la temperatura del suelo.

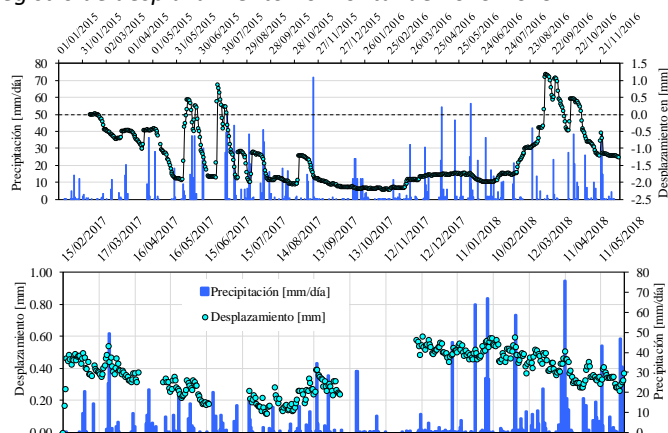
#### 4.2.6. Medidas de extensómetro

El extensómetro horizontal se ha auscultado en la cabecera del deslizamiento en el año 2013, para medir los desplazamientos horizontales. El equipo empleado fue de WS/POSIWIRE "Position Sensors" de ASM WS12-3000. En el presente trabajo se ha considerado los registros desde 2015 a 2019, aunque entre junio a noviembre del 2018 no se registró debido al mantenimiento del equipo.

La finalidad de extensómetro fue para registrar los desplazamientos que pueden ocurrir en la ladera. La información analizada indica entre el periodo de

monitoreo de 2019 a 2019 no existe movimiento, resulta desplazamientos menores de 1 mm (Ver Figura 12); por tanto, el cuerpo del deslizamiento se encuentra estable.

**Figura 12**  
Registro de desplazamiento horizontal de 2015-2019



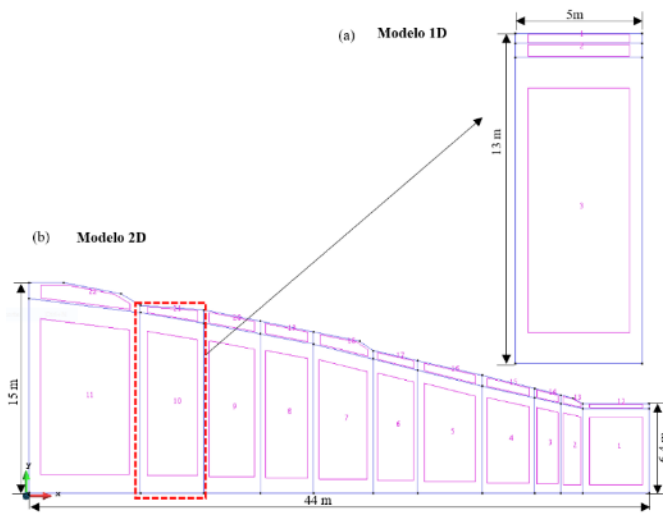
**Nota:** Los desplazamientos se encuentran menores a 1mm.

### 5. Modelización numérica – Termo Hidráulico

Para la modelización se utilizó el código Code\_Bright desarrollado por la Universidad Politécnica de Catalunya, este código trabaja sobre el interfaz del Software GiD para pre y post procesamiento. El código COde\_Bright resuelve problemas de acoplamiento Termo-Hidro-Mecánico en medios geológicos. La formulación matemática se basa en un conjunto de ecuaciones que gobiernan y se agrupan en 4 grupos principales: (1) ecuaciones de balance de masas sólidas, agua, aire, momentos y energía; (2) ecuaciones constitutivas ley de Darcy, Fick y Fourier; (3) condiciones de equilibrio dado por la ley de Henry y Psicométrica; (4) condición de contorno de flujo y condiciones atmosféricas.

Para el presente trabajo se desarrolló dos modelos, unidimensional (1D) y bidimensional (2D), ambos modelos con acoplamiento Termo-Hidráulico (TH), para evaluar la influencia de factores atmosféricos en el deslizamiento (ladera Cercs); es decir, simular la evolución del comportamiento de los flujos (agua, aire y energía), como funciones variables de estado: presión de líquido, presión de gas y temperatura del suelo. La simulación se realizó para 4 años de enero 2015 a diciembre 2018, con discretización temporal por día. Los resultados del modelo serán comparados con los registros de monitoreo.

**Figura 13**  
Definición del modelo 1D y 2D para el análisis TH



Nota: Elaboración propia  
 (a) Modelo unidimensional 1D  
 (b) Modelo bidimensional 2D

La metodología para la modelación numérica en modelo 1D y 2D, en Code\_Bright comprende de ocho pasos básicos: (1) Definición de la geometría del modelo mediante puntos, líneas y superficie (NURBS). (2) Definir los datos del problema. (3) Definir los parámetros de los materiales que involucran. (4) Definición de las condiciones de contorno (flujo y atmosférico). (5) Definir intervalo de datos. (6) Generación de la malla con refinamiento en la zona de interés. (7) Etapa de cálculo en Code\_Bright y (8) Post procesamiento y visualización de los resultados del modelo.

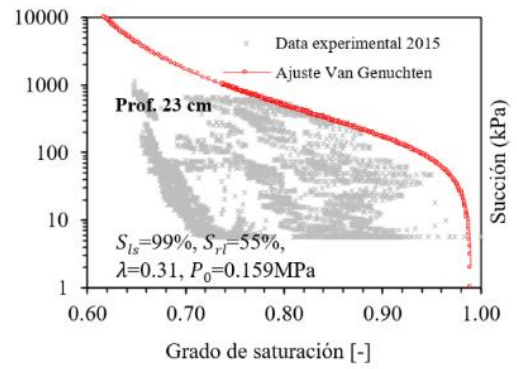
### 5.1. Parámetros de los materiales

Los parámetros que se requiere para la modelación TH en cada estrato son: curva de retención, permeabilidad intrínseca, permeabilidad relativa en fase líquida y gas, flujo difusivo de vapor y flujo conductivo de calor.

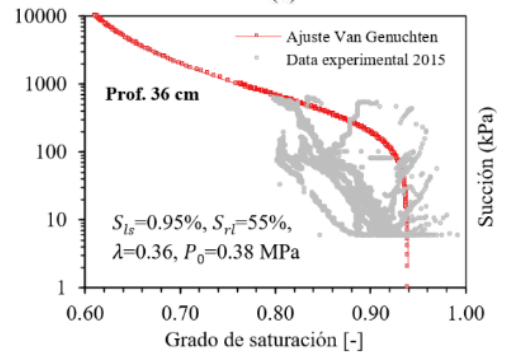
La curva de retención para los estratos coluvial y argilita alterada fue obtenida a partir de datos de monitoreo de Succión vs contenido volumétrico de agua esta última expresado a grado de saturación (Ver Figura 14); además los datos experimentales fueron ajustados al modelo teórico Van Genuchten (1980) expresado en la ecuación (Ec-2).

Figura 14

Curva de retención experimental y ajuste Van Genuchten



(a)



(b)

Nota: (a) Curva de retención para coluvial, (b) curva de retención para el estrato argilita alterada.

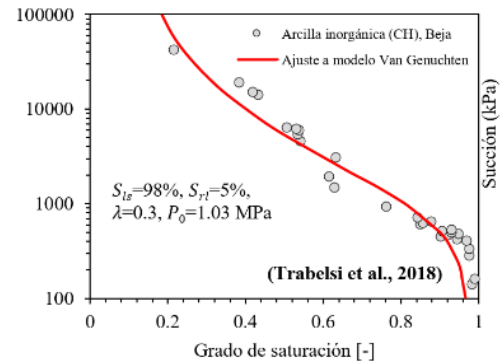
$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[ 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (\text{Ec-2})$$

Donde:  $S_e$  grado de saturación efectiva,  $S_l$  grado de saturación,  $S_{ls}$  grado de saturación máxima,  $S_{rl}$  grado de saturación residual,  $P_g$  presión de gas,  $P_l$  presión de líquido,  $P$  y  $\lambda$  son parámetros del modelo Van Genuchten.  $P = P_0(\sigma/\sigma_0)$ ,  $P_0$  presión inicial de desaturación y  $\sigma_0$  tensión superficial.

Por un lado, para el estrato de argilita inalterada no se dispone de datos experimentales de campo, por lo tanto, se consideró la curva de retención obtenida del trabajo Trabelsi, Hadrich y Gruiras (2018), para las mismas características de arcilla (argilita inalterada).

Figura 15

Curva de retención para el estrato argilita



Fuente: Curva de retención obtenida del trabajo de Trabelsi (2018)

Los parámetros de curva de retención para los tres estratos se encuentran resumida en la Tabla 3.

La permeabilidad intrínseca fue obtenida a través de ensayos de campo y ensayos laboratorio, las cuales se

detallan en el ítem 3.2.3. La porosidad de cada material fue obtenida en laboratorio y se muestra en la Tabla 3.

Para determinar la permeabilidad relativa en la fase líquida para cada estrato es obtenida a partir del modelo Van Genuchten, el grado de saturación máxima y residual, se muestran en la Tabla 3.

Para flujo difusivo de vapor y flujo conductivo de calor los parámetros fueron asumidos de la literatura valores representativos, y se muestran en la Tabla 3.

También, las variables atmosféricas forman parte de imput de datos para la solución de las ecuaciones de balance de agua y energía; mientras la presión del gas se consideró constante de 0.1 MPa. Los variables atmosféricas la temperatura atmosférica, presión de gas atmosférica, humedad relativa, radiación, índice de nubosidad, precipitación y velocidad de viento, estos datos fueron registradas en la zona de estudio en periodo 2015 a 2018. Finalmente, el modelo requiere definir la condición de contorno atmosférico y estas se encuentran resumidas en la Tabla 4.

### 5.2. Resultados de la modelación TH

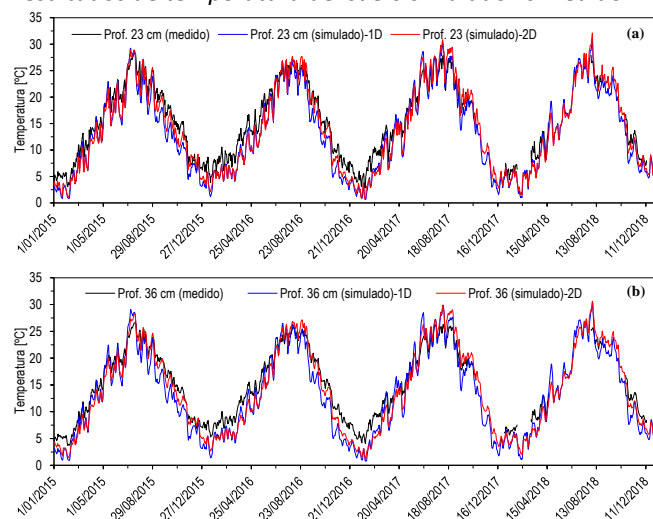
Los resultados de la modelación se muestran para 4 años de 2015 a 2018. Las variables simuladas son tres: la temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua y presión de líquido.

#### 5.2.1. Temperatura

Los resultados de la temperatura del suelo obtenido a partir de la modelación TH se comparó con los datos de monitoreo registrado con sensor MPS-2 in situ, a 23 y 36 cm de profundidad, así como se muestra en la Figura 16. En forma general los resultados entre simulado y registro in situ, muestran comportamiento coherente para años 2015 a 2018.

#### Figura 16

Resultados de temperatura del suelo simulado vs medido



**Nota:** Línea color negra medido, azul simulado en 1D y rojo simulado en 2D  
(a) Resultado de temperatura del suelo para 23 cm de profundidad.  
(b) Resultado de temperatura del suelo para 36 cm de profundidad.

#### 5.2.2. Contenido volumétrico de agua

Con la modelación se obtiene el grado de saturación del suelo a 23 y 36 cm de profundidad, para 4 años de

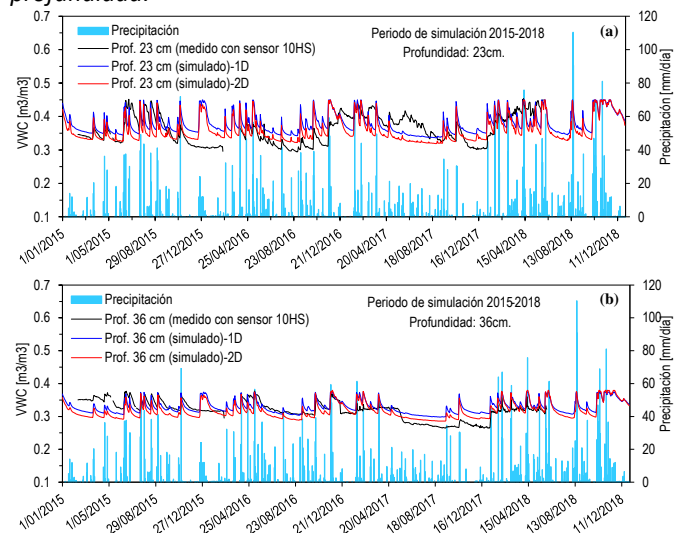
2015 a 2018. Para efectos de comparación el grado saturación fue convertido en términos de contenido volumétrico de agua. Posteriormente, es comparado entre datos simulados del modelo y datos de monitoreo obtenido con sensor 10HS, y los resultados se muestran en la Figura 17.

Los resultados de contenido volumétrico de agua (VWC) para 23 cm de profundidad tienen tendencia regular entre la simulación del modelo (1D y 2D) y los datos de campo registrado con el sensor 10HS, aunque existe algunos periodos con variaciones de  $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$  de VWC entre modelo y datos de campo. El modelo 2D se ajusta mejor a las medidas del sensor 10HS, esto debido a que toma en cuenta la corrección de radiación solar de acuerdo a la orientación de la ladera.

Los resultados VWC para 36 cm de profundidad tiene buena tendencia. Además, el tiempo de respuesta del suelo a procesos de mojado y secado, resultan muy similares entre simulado y medido con el sensor.

#### Figura 17

Resultados de contenido volumétrico de agua (VWC) simulado vs medido con el sensor 10HS a 23 y 36 cm de profundidad.



**Nota:** Línea color negra medido, azul simulado en 1D y rojo simulado en 2D  
(a) Resultado de VWC del suelo para 23 cm de profundidad.  
(b) Resultado de VWC del suelo para 36 cm de profundidad.

#### 5.2.3. Succión

Los resultados obtenidos de la modelización proporcionan directamente la presión de líquido en absolutas, es decir considerando la presión atmosférica ( $P_g$ ) de 0.1 MPa. Para convertir los datos de presión de líquido ( $P_l$ ) a succión matricial se utiliza la ecuación  $Succión = P_g - P_l$ . Esta conversión se realiza con la finalidad de comparar con los registros de monitoreo del sensor MPS-2 que mide el potencial hídrico (succión).

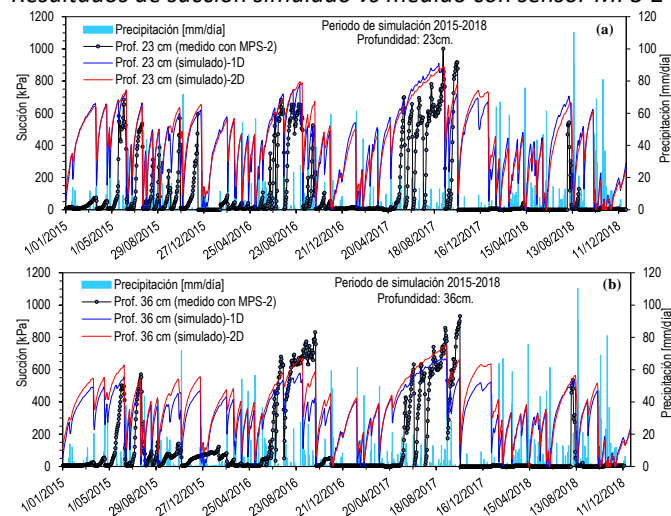
De forma general en la Figura 18 se aprecia dos tendencias: (1) cuando la precipitación se registra por encima de 30 mm/día, se produce infiltración al suelo, por tanto, se reduce la succión considerablemente de 5



a 10 kPa; y (2) cuando la precipitación disminuye por debajo de 30 mm/día la succión aumenta notablemente.

**Figura 18**

Resultados de succión simulado vs medido con sensor MPS-2



**Tabla 3**

Parámetros de los materiales para la modelación Termo-Hidráulico (TH)

Descripción-Parámetros	Variable	Unidad	Coluvial	Argilita Alterada	Argilita Inalterada
<b>Curva de retención (modelo Van Genuchten), ITYCL 1.</b>					
Valor de entrada de aire.	$P_0$	[MPa]	0.159	0.380	1.030
Tensión superficial del agua.	$\sigma_0$	[N/m]	0.072	0.072	0.072
Factor de forma del modelo Van Genuchten.	$\lambda$	[-]	0.31	0.36	0.30
Valor de saturación residual.	$S_{r1}$	[-]	0.55	0.55	0.05
Valor de saturación máxima.	$S_{1s}$	[-]	1.00	0.95	1.00
<b>Permeabilidad intrínseca (Modelo Kozeny), ITYCL 1.</b>					
Permeabilidad intrínseca (1º dirección principal).	$(k_{11})_0$	[m <sup>2</sup> ]	2.97E-15	5.76E-16	9.34E-17
Permeabilidad intrínseca (2º dirección principal).	$(k_{22})_0$	[m <sup>2</sup> ]	2.97E-15	5.76E-16	9.34E-17
Permeabilidad intrínseca (3º dirección principal).	$(k_{33})_0$	[m <sup>2</sup> ]	2.97E-15	5.76E-16	9.34E-17
Porosidad inicial del material.	$\phi_0$	[-]	0.373	0.356	0.300
Porosidad mínima del material.	$\phi_{min}$	[-]	0.010	0.010	0.010
<b>Permeabilidad relativa en la fase líquida (modelo Van Genuchten), ITYCL 1.</b>					
Factor de forma del modelo Van Genuchten.	$\lambda$	[-]	0.31	0.36	0.30
Valor de saturación residual.	$S_{r1}$	[-]	0.55	0.55	0.05
Valor de saturación máxima.	$S_{1s}$	[-]	1.00	0.95	1.00
<b>Permeabilidad relativa de fase gas (Ley cúbica), ITYCL 6</b>					
	A	[-]	1.00	1.00	1.00
	$\lambda$	[-]	3.00	3.00	3.00
<b>Flujo difusivo de vapor (-), ITYCL 1</b>					
Parámetros para la difusión molecular de vapor o aire.	D	[-]	5.90E-06	5.90E-06	5.90E-06
	n	[-]	2.30	2.30	2.30
Coeficiente de tortuosidad.	$[\tau_0]$	[-]	1.00	1.00	1.00
<b>Flujo conductivo de calor, ITYCL 1</b>					
Conductividad térmica del medio poroso seco.	$\lambda_{dry}$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0.22	0.22	0.22
Conductividad térmica del medio poroso saturado.	$\lambda_{sat}$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	1.10	1.10	1.10

**Tabla 4**

Datos para definir la condición de contorno atmosférico

Condiciones de contorno atmosférica	Variable	Unidad	Ladera Cercs
Latitud	$\lambda$	[rad]	0.735582557
Tiempo cuando inicia el otoño	$t_s$	[S]	14947200

**Nota:** Línea color negra medido, azul simulado en 1D y rojo simulado en 2D

(a) Resultado de Succión del suelo para 23 cm de profundidad.

(b) Resultado de Succión del suelo para 36 cm de profundidad.

La comparación de los resultados de succión entre simulado y medido en campo con el sensor MPS-2, en varios periodos existe discrepancia, posiblemente el proceso de humedecimiento es rápido debido a larga duración de lluvias y el proceso de secado es lenta porque existe nubosidad. Mientras, la modelización calcula para ambiente despejado considerando la radiación solar durante todo el día.

Tiempo al medio día	$t_m$	[S]	43200
Altura de rugosidad principal de la superficie	$Z_0$	[m]	0.2
Altura de medición del viento	$Z_a$	[m]	2.00
Factor de estabilidad	$\phi$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1.00
Densidad del gas atmosférico	$\rho_{sa}$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1.20
Albedo seco	$A_d$	[-]	0.25
Albedo húmedo	$A_w$	[-]	0.20
Coefficiente de almacenamiento de gas	$\gamma_g$	[kg.m <sup>-2</sup> S <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ]	1.00E+06
coeficiente de almacenamiento de líquido	$\gamma_l$	[kg.m <sup>-2</sup> S <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ]	-1.00E+06
Factor de lluvia	$K_{rain}$	[-]	1.00
Factor de radiación	$K_{rad}$	[-]	1.00
Factor de evaporación	$K_{evap}$	[-]	1.00
Dip (inclinación de la ladera)	$\theta$	[rad]	0.349
Strike (Orientación)	$\sigma$	[rad]	2.356
Tipo de radiación	$T_{rad}$	[-]	3.00
Fracción de vegetación	$F_{veg}$	[-]	0.00

## 6. Análisis de estabilidad

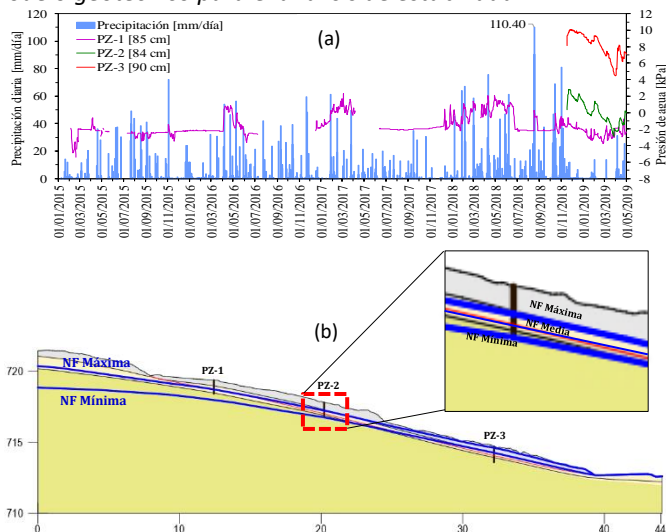
### 6.1. Análisis por dovelas - Equilibrio límite

El análisis de estabilidad en ladera y taludes implica determinar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de superficie más probable de falla con la resistencia contratante del suelo, determinándose el factor de seguridad. Para el análisis de estabilidad se realizó en el programa Slide2 versión 2018 de Rocscience; este programa analiza en dos dimensiones mediante la metodología de equilibrio límite y obtiene el factor de seguridad.

El análisis de estabilidad del deslizamiento Cercs, se analizó bajo siguientes criterios: (1) condición de análisis estático únicamente; (2) tipo de falla traslacional; (3) método de análisis Spencer; (4) superficie de falla impuesta al modelo; (5) condición de agua mínimo, media y máximo a partir de la historia piezométrica de 2015 a 2018; (6) la condición sísmica no se consideró debido en la zona es muy baja; (7) factor de seguridad aceptable mayores a la unidad, es decir el deslizamiento se mantendrá estable. En la Figura 19 se muestra el modelo para el análisis por equilibrio límite.

Figura 19

Modelo geotécnico para el análisis de estabilidad



Nota: Nivel de agua para tres condiciones; mínimo, media y máximo.

(a) Registro de piezometría de 2015 a 2018

(b) Sección típica para realizar el análisis de estabilidad

Las propiedades de resistencia de los materiales que componen el modelo geotécnico del deslizamiento Cercs, han sido determinado a partir de ensayos de laboratorio, así como; clasificación SUCS, ensayos de corte directo y corte anular, para los tres estratos identificados coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. La caracterización del material esta descrito en el ítem 3.2.1 y 3.2.2.

En la Tabla 5 se presenta los parámetros de resistencia asignados a los materiales que intervienen al modelo geotécnico.

Tabla 5

Resumen de propiedades de resistencia

Estrato	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kPa)	Angulo de fricción (°)
Coluvial	20.2	18.7	32
Argilita alterada	20.6	0	15
Argilita inalterada	20.8	16.9	28

En la Tabla 6 se presenta el resumen de los factores de seguridad obtenido para tres condiciones de variación de nivel freático durante 2015 a 2018. En este análisis se excluye la parte pseudo-estática debido a que en la zona no presenta sismicidad. Los resultados muestran que son estables y es coherente con los resultados de extensómetro horizontal que no registro movimiento durante 2015 a 2018.

Tabla 6

Factores de seguridad en deslizamiento Cercs

Condición de Nivel freático 2015 a 2018	Factor de seguridad – Estático
NF mínima	1.351
NF media	1.258
NF máxima	1.153

Nota: NF nivel freático, superficie de falla impuesta.

### 3.1. Análisis por metodología de talud infinito

Esta metodología se analiza en deslizamientos superficiales de tipo traslacional cuya superficie de deslizamiento es casi paralela a la superficie del terreno.

La resistencia al corte en suelos saturados se describe a partir de tensiones efectivas definida por Terzaghi (1936). Y la representación del criterio de rotura Mohr-Coulomb mediante una recta (envolvente de rotura), definida por la ecuación clásica:  $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ . Sin embargo; para el caso, de suelos parcialmente saturados la tensión normal efectiva depende de tención mátrica (succión). En consecuencia, Lu y Likos (2004) la propuesto el criterio generalizado para suelos saturados y parcialmente saturado, obtener la tensión efectiva mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma' = (\sigma - P_g) - \sigma^s \quad (\text{Ec-3})$$

Donde:  $P_g$  es la presión de gas (aire);  $P_l$ , presión de líquido (agua);  $\sigma^s$ , es definido como la tensión de succión a partir de la curva característica del suelo en función de:

$$\sigma^s = -(P_g - P_l) \quad P_g - P_l \leq 0 \quad (\text{Ec-4})$$

$$\sigma^s = f(P_g - P_l) \quad P_g - P_l > 0 \quad (\text{Ec-5})$$

Donde,  $P_l$ , presión de líquido (agua);  $P_g$  es la presión de gas (aire); f es una función definida a partir de grado de saturación efectiva o contenido volumétrico de agua. Lu y Likos (2004) demostró obtener  $\sigma^s$  a partir de

formulaciones matemáticas o ensayos de resistencia al corte, bajo la definición de tensión efectiva propuesta por Bishop (1959) con amplia evidencia experimental. La tensión de succión  $\sigma^s$  queda definida en términos de contenido volumétrico de agua o grado de saturación efectiva (Lu y Likos, 2004).

$$\sigma^s = -\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}(u_a - u_w) = -\frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}}(P_g - P_l) \quad (\text{Ec-6})$$

Donde;  $\theta$  contenido volumétrico de agua;  $\theta_r$  contenido volumétrico de agua residual,  $\theta_s$  es el contenido volumétrico de agua máxima;  $S_l$ , grado de saturación;  $S_{ls}$ , grado de saturación máxima;  $S_{rl}$ , grado de saturación residual;  $P_g$ , presión de gas (aire);  $P_l$ , presión del líquido (agua); succión ( $P_g - P_l$ ).

Finalmente, la ecuación para el cálculo de FS queda de la siguiente manera:

$$FS = \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} + \frac{2c'}{\gamma H \sin 2\beta} - \frac{\sigma^s}{\gamma H} (\tan\beta + \cot\beta) \tan\phi' \quad (\text{Ec-7})$$

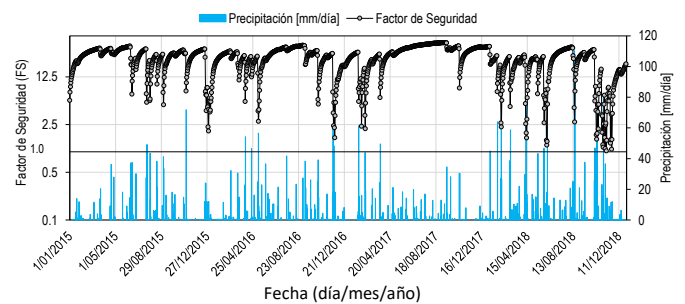
Donde,  $c'$  y  $\phi'$  cohesión y ángulo de fricción en efectiva,  $\beta$  inclinación del talud,  $H$  profundidad donde se sitúa la superficie de rotura,  $\gamma$  peso específico del material,  $\sigma^s$  es tensión mátrica obtenida a partir del modelo TH de la curva característica, considerando succión el grado de saturación.

Para el cálculo de factor de seguridad mediante el método de talud infinito se consideró los siguientes datos: cohesión nula, ángulo de fricción residual ( $\phi'$ ) 15 grados, profundidad de superficie de falla ( $H$ ) 0.60 m, peso específico  $20.60 \text{ kN/m}^3$ , inclinación del talud ( $\beta$ ), 12 grados, grado de saturación máxima ( $S_{ls}$ ) 1.00; grado de saturación residual ( $S_{rl}$ ) 0.55; el grado de saturación ( $S_l$ ) varía en función del tiempo y comportamiento atmosférico, el cual es obtenida a partir de la simulación del modelo TH, asimismo la succión es obtenida a partir del modelo a partir de la diferencia entre presión de gas y presión de líquido que varía en el tiempo.

El cálculo de factor de seguridad se realizó para cada día desde el año 2015 a 2018 (Ver Figura 20), donde se puede observar todos los factores de seguridad son superiores a la unidad, esto significa que el deslizamiento se encuentra estable. Asimismo, se deduce que, cuando existen precipitaciones mayores a 50 mm/día existe una pérdida de resistencia al corte debido al incremento de presión intersticial y el FS disminuye cercano a la unidad. Mientras la precipitación es menor los FS resultan muy superiores a la unidad, esto nos da a entender que la succión contribuye a la resistencia.

#### Figura 20

Factor de seguridad para suelos parcialmente saturado 2015-2018.

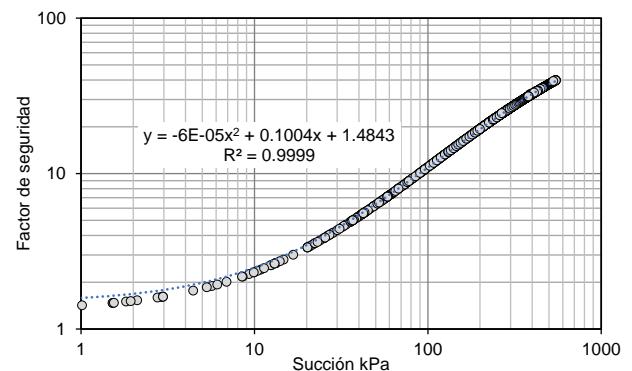


Nota: Factor de seguridad mínima 1.03

En la Figura 21, se muestra la relación entre FS y succión. Donde se observa, el FS incrementa mayores a 2 cuando la succión aumenta superior a 10 kPa, es decir cuando el suelo inicia el proceso de secado, es debido al incremento de la temperatura por radiación solar.

#### Figura 21

Relación entre factor de seguridad vs succión



## 7. Conclusiones

La caracterización geológica y geotécnica de deslizamiento superficial de Cercs, permitió elaborar el modelo geotécnico apropiado diferenciando en tres materiales; coluvial, argilita alterada y argilita inalterada. Asimismo, se determinó los parámetros resistentes e hidráulicas para cada estrato.

La instrumentación y monitoreo fueron importantes para entender el comportamiento del suelo ante la variación constante de factores atmosféricos (precipitación, humedad relativa, temperatura, presión atmosférica, radiación y velocidad del viento). La evaluación de datos de monitoreo se efectuó para cuatro años comprendidos de 2015 a 2018.

La modelización numérica se realizó mediante elementos finitos, para simular el comportamiento termo-hidráulico en la interacción de suelo-atmosfera. Y los parámetros obtenidos fueron: temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua y succión.

La temperatura del suelo a 23 y 36 cm de profundidad resultó congruente entre simulado vs medido con el sensor MPS-2. El modelo 2D es el que más se ajusta, ya que la radiación solar fue corregida acorde a la orientación e inclinación de la ladera.

El contenido volumétrico de agua en suelo a 23 y 36 cm de profundidad resultaron adecuados entre



simulado en modelo TH vs medido con el sensor 10HS. Entonces se concluye que el contenido volumétrico de agua está controlado por la precipitación y radiación solar.

La succión es un parámetro difícil de reproducir en la simulación ya que reflejó discrepancias mayores entre simulado vs medido.

Los análisis de estabilidad tales como: observación directa de registros de desplazamiento horizontal, análisis de estabilidad por equilibrio límite, y análisis de estabilidad en enfoque de talud infinito incluyendo variables de curva de retención (succión-grado de saturación); han demostrado que el deslizamiento existente en Cercs se encuentra estable.

Finalmente, los deslizamientos superficiales se pueden activarse ante las precipitaciones pluviales intensas, ya que se produce la infiltración de agua en suelo y se incrementa la presión intersticial por ende la resistencia al corte disminuye. Sin embargo, cuando no hay precipitaciones el suelo empieza a secarse y aumenta la succión e incrementa la resistencia al corte.

#### **Agradecimientos**

A todo el comité de PERÚMIN por la invitación, difusión de conocimientos científicos y técnicos en sector minero y académico. Asimismo, a la Universidad Politécnica de Catalunya por haberme concedido desarrollar la presente investigación. Finalmente, SRK Consulting Peru S.A. por permitirme mi desempeño profesional.

#### **Referencias**

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Boyce, G.M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods, Second Edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Alonso, E. E., Pinyol, P. N. (2007). Parámetros de Diseño, Métodos de Cálculo y Solicitaciones. En *Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses* (pp. 45-117).
- Andrea, T., Friedel, S., Plötze, M., Springman, S. M. (2005). Combined approach for site investigation in terms of the analysis of rainfall induced landslides. In *Proceedings of the 16th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering* (pp. 2591-2594).
- Corominas, J., Moya, J., Ledesma, A., Lloret, A., Gili, J. A. (2005). Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). *Landslides*, 2(2), 83-96.
- Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. (2019). *CODE\_BRIGHT User's Guide*. Universidad Politécnica de Catalunya-Barcelona Tech. España.
- Hürlimann, M., Moya, J., Abanico, C., Vilajosana, I. (2013). Auscultación de Movimientos de Ladera para la Implementación de Sistemas de Alerta. Ejemplo del

Pirineo y Prepirineo Central y Oriental. VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, p. 51-56. ICGC. (2018). Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. Recuperado de <http://www.icc.cat/vissir3/>.

Lu, N., Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. Hoboken, New Jersey, United States: John Wiley and Sons, Inc.

Olivella, S., Carrera, J., Gens, A., Alonso, E. E. (1994). Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Transport in porous media*, 15(3), 271-293.

Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B., Leong, E. C., Fredlund, D. G. (2010). Response parameters for characterization of infiltration. *Environ Earth Sci*, 60, 1369-1380.

Rocscience Inc. (2018). *Slide 2018 2D Limit Equilibrium Analysis of Slope Stability*. Toronto.

Trabelsi, H., Hadrich, B., Guiras, H. (2018). Evaporation, shrinkage and intrinsic permeability of unsaturated clayey soil: analytical modelling versus experimental data. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8), 184.

#### **Perfil profesional – Autor principal**

Ingeniero geólogo y MSc. En Ingeniería geotécnica, actualmente se desempeña como consultor geotécnico en la empresa SRK Consulting (Peru) S.A., con 10 años de experiencia en Ingeniería geotécnica relacionado a túneles mineros, tajos abiertos, análisis de estabilidad de taludes, instrumentación geotécnica y QA/QC de logeo geotécnico de perforaciones diamantinas convencionales y orientado. También, se desempeña como profesor a tiempo parcial en la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica.

Angel Mamani Mayta

Consultor en geotécnica

SRK Consulting (Peru) S.A. / Universidad Nacional de Ingeniería

[amamani@srk.com.pe](mailto:amamani@srk.com.pe) / [amamani@uni.edu.pe](mailto:amamani@uni.edu.pe)

+51 946 876 995

Lima, Perú.

#### **Perfil profesional – Coautor 1**

Marcel Hürlimann: PhD en Ciencias Geológicas, actualmente se desempeña como docente investigador en la Universidad Politécnica de Catalunya Barcelona Tech, Departamento de Ingeniería Ambiental y Civil. Tiene más de 65 publicaciones científicas en las revistas indexadas, así como; *Landslides*, *Engineering geology*, *Journal of volcanology and geothermal research*, *water and geomorphology*.

Marcel Hürlimann Ziegler

Politécnica de Catalunya BarcelonaTech

Profesor Asociado de Ingeniería Geológica, departamento de Ingeniería Ambiental y Civil – UPC Barcelona TECH.

marcel.hurlimann@upc.edu  
Barcelona, España.