



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Análisis del comportamiento del suelo por infiltración en una ladera y su relación ante el deslizamiento superficial de Cercs

Trabajo realizado por:

**Gabriel Martínez Camposano**

Dirigido por:

**Marcel Hürlimann**

Máster en:

**Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica**

Barcelona, Septiembre de 2016

Departamento de Caminos, Canales y Puertos

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**



## Resumen

Los deslizamientos son un tipo de movimiento de ladera desencadenado por varios factores que mayormente se relacionan a fuertes lluvias. Se han llevado a cabo una serie de experimentos de campo para estudiar los efectos de la infiltración de la lluvia y como pone en riesgo la estabilidad del talud. Se han colocado dos estaciones de monitoreo, una meteorológica, que cuenta con un sistema completo de medición pluviométrica y otra que analiza la actividad hidrogeológica de la ladera por medio de sensores de potencial hídrico, contenido de agua volumétrica, piezómetros y un extensómetro.

La presente investigación interpreta y analiza los resultados obtenidos por el monitoreo de la ladera localizada en Cercs, en la comarca de Berguedà, Cataluña, para el año 2015. Esta se inicia con la organización de los registros pluviométricos, seguido de los obtenidos por los sensores instalados dentro del coluvión, compuesto de una matriz arcillosa. Por debajo del coluvión se encuentra un estrato deslizado compuesto de argilitas alteradas y altamente fisuradas, seguido por argilitas intactas.

El análisis comprueba que el año 2015 fue mayormente seco, salvo algunos episodios de lluvias intensas capaces de saturar el suelo de forma rápida y generar un aumento de presiones de poros. Para el análisis hidrogeológico, se toman los diez episodios con precipitaciones de mayor intensidad para este año y se realizan comparaciones con los cambios en la succión, contenido de agua y oscilaciones del nivel freático que tuvo el suelo del coluvión. Estos revelan que las características geotécnicas del suelo podrían variar significativamente con respecto a la superficie, a pesar que los sensores, uno colocado a 23cm por debajo de la superficie y otro a 36 cm, responden de forma similar ante intensidades altas de lluvias. Los sensores en general presentan mayores cambios con respecto a lluvias intensas de larga duración que de corta duración. La realización de una curva de retención detectó que al momento de secado, el contenido de agua del suelo exhibe valores más altos que al momento de humectación, presentándose el principio de histéresis. Por otro lado, el agua precipitada en Cercs para el año 2015 no provocó ningún aumento para tener valores positivos. El piezómetro de cuerda vibrante solamente registró medidas de succión y el extensómetro no registró movimientos significativos.

Finalmente se elaboró un análisis de estabilidad, utilizando un programa basado en el método de equilibrio para evaluar el factor de seguridad, con el fin de comprobar la estabilidad de la situación actual de la ladera y futuros desencadenantes de deslizamientos. La situación actual de la ladera resultó tener un factor de seguridad (FS)  $>1$ , por lo que se encuentra estable siempre y cuando el nivel freático no sature las argilitas alteradas. Para que la ladera falle, el piezómetro debe obtener una lectura cercana a 4.5 kPa, que equivale a un aumento del nivel freático 45 cm por encima del sensor.

## Abstract

Landslides are a type of slope movement triggered by several factors mainly related to heavy rains. In order to understand slope water infiltration, a series of field experiments have been conducted to identify the current slope stability. In order to record activity, two monitoring stations were placed, one of them is composed by weather instrumentations, which include a rain gauge and the other station is dedicated for hydrogeological analysis, which include water potential sensors, volumetric water content sensors, a piezometer, and an extensometer.

This research interprets and analyzes the results obtained by monitoring the slope located in Cercs, in the region of Berguedà, Catalonia, for the year 2015. This investigation starts with the organization of the rainfall records, followed by those obtained from the sensors installed inside the colluvium, composed of a clay matrix. A layer of altered and fissured argillites lies below the colluvium, followed by intact argillites.

The current meteorological analysis show year 2015 was mostly dry, except for some episodes of heavy rains, which can infiltrate quickly and generate pore pressures. For the hydrogeological analysis, the ten episodes with the most intense precipitations were used to compare the changes observed in water potential, water content and the water table fluctuations. These reveal the geotechnical characteristics of the soil may vary significantly with respect to the surface, despite the distance between sensors, one positioned 23cm and the other 36 cm below the surface, responding similarly to rainfall of high intensities. The sensors in general have greater response rate to long duration rainfall than it does to short duration with high intensity episodes. A retention curve shows a higher value in soil's water content when it's drying than when it gets wetted, relating it to the hysteresis principle. On the other hand, the rainfall recorded in Cercs for the year 2015 did not cause positive pore pressure values. The vibrating wire piezometer measurements only logged water potential values and the extensometer registered no significant movements.

Finally, a stability analysis was designed using an equilibrium method based software to evaluate the safety factor, in order to check the stability of the slope's current state and possible future triggers that can cause a landslide. The slope's current situation turned out to have a safety factor  $(FS) > 1$ , making it stable as long as the water table does not saturate the altered argillites. For the slope to fail, the piezometer should get a reading close to 4.5 kPa, equivalent to an increase of 45 cm in the water table from the sensor.

## ÍNDICE

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
<b>1. Introducción y objetivos .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Marco Conceptual.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Infiltración .....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Factores que afectan la infiltración .....	9
2.1.2 Proceso de infiltración por lluvia .....	10
2.1.3 Ley de Darcy .....	10
<b>2.2 Movimientos de ladera .....</b>	<b>12</b>
2.2.1 Tipología de movimientos de laderas .....	12
2.2.2 Deslizamientos.....	13
2.2.3 Clasificación de un deslizamiento .....	14
2.2.5 Partes principales de un deslizamiento .....	16
2.2.6 Mecanismo de activación .....	18
2.2.6.1 Formación de falla en una ladera.....	18
2.2.6.2 Superficie de falla.....	18
2.2.6.4 Contenido de agua.....	20
2.2.6.5 Variaciones en el nivel freático .....	21
2.2.6.6 Parámetros Resistentes del Suelo.....	21
<b>2.3 Análisis de estabilidad.....</b>	<b>24</b>
2.3.1 Método de equilibrio limite.....	25
2.3.1.1 Análisis de roturas planas en taludes infinitos .....	26
2.3.1.2 Análisis de la masa total deslizante (Método de Taylor).....	27
2.3.1.3 Método de rebanadas.....	28
<b>3. Metodología de trabajo.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1 Caracterización geográfica .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2 Caracterización geológica.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3 Recopilación de información de trabajos previos.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4 Recopilación de datos de la auscultación .....</b>	<b>36</b>
<b>3.5 Respuesta del suelo de la precipitación anual.....</b>	<b>36</b>
<b>3.6 Análisis de Estabilidad.....</b>	<b>36</b>
<b>4. Descripción de la Zona de Estudio .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Contexto Geográfico .....</b>	<b>37</b>
4.1.1 Límites geográficos .....	37
<b>4.2 Contexto Geológico.....</b>	<b>38</b>
4.2.1 Clasificación del suelo.....	38
4.2.2 Medición de la Resistencia a esfuerzo cortante .....	40
4.2.3 Resultados de los ensayos de laboratorio .....	41
<b>4.3 Contexto Geomorfológico .....</b>	<b>43</b>
<b>5. Instrumentación.....</b>	<b>46</b>
<b>5.1 Estación METEO .....</b>	<b>47</b>
<b>5.2 Estación SLOPE.....</b>	<b>47</b>
5.2.1 Instalación de sensores.....	50

<b>6.</b>	<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>51</b>
<b>6.1</b>	<b>Análisis hidrogeológico del año 2015 .....</b>	<b>51</b>
6.1.1	Precipitación .....	51
6.1.2	Infiltración .....	52
6.1.2.1	Potencial hídrico (Succión).....	53
6.1.2.3	Contenido de agua.....	56
6.1.2.2	Piezometría.....	58
6.1.3	Desplazamiento .....	59
<b>6.2</b>	<b>Análisis hidrogeológico para los episodios con mayor precipitación .....</b>	<b>59</b>
6.2.1	Episodio de larga duración .....	59
6.2.1.1	Potencial hídrico (succión) .....	60
6.2.1.2	Contenido de agua.....	61
6.2.1.3	Piezometría.....	62
6.2.1.4	Desplazamiento .....	63
6.2.2	Episodio de corta duración .....	64
6.2.2.1	Potencial Hídrico (Succión) .....	64
6.2.2.2	Contenido de agua.....	65
6.2.2.3	Piezometría.....	66
6.2.2.4	Desplazamiento .....	67
6.2.3	Correlación entre la precipitación y la respuesta del suelo.....	68
6.2.3.1	Precipitación y el potencial hídrico .....	68
6.2.3.2	Precipitación y el contenido de agua .....	70
6.2.3.3	Precipitación y el piezómetro .....	73
6.2.3.4	Precipitación y el desplazamiento.....	74
<b>7.</b>	<b>Cálculo de Estabilidad.....</b>	<b>75</b>
<b>7.1</b>	<b>Método de evaluación .....</b>	<b>75</b>
<b>7.2</b>	<b>Datos de entrada .....</b>	<b>76</b>
7.2.1	Geometría de la superficie .....	76
7.2.1.1	Contorno Exterior .....	76
7.2.1.2	Contornos Interiores (sustratos y superficie de falla) .....	76
7.2.1.3	Coordenadas .....	77
7.2.2	Propiedades de los materiales.....	78
7.2.3	Modelamiento de la superficie .....	78
7.2.4	Hipótesis del análisis.....	79
<b>7.3</b>	<b>Condición Actual .....</b>	<b>79</b>
<b>7.4</b>	<b>Saturación Argilitas Alteradas .....</b>	<b>81</b>
<b>7.5</b>	<b>Saturación completa del terreno.....</b>	<b>82</b>
<b>7.6</b>	<b>Análisis de sensibilidad .....</b>	<b>84</b>
7.6.1	Angulo de rozamiento residual vs FS.....	84
7.6.1.1	Condición actual.....	84
7.6.1.2	Saturación argilitas alteradas.....	85
7.6.1.3	La saturación completa del terreno .....	86
7.6.2	Nivel piezométrico vs FS .....	86
<b>8.</b>	<b>Conclusión.....</b>	<b>89</b>
<b>9.</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. TASA DE INFILTRACIÓN DEL SUELO HASTA LLEGAR LA SATURACIÓN. ....	9
FIGURA 2. ILUSTRACIÓN DEL MOVIMIENTO DE MASA QUE PRESENTA UN DESLIZAMIENTO. (DIAZ, 2012).....	13
FIGURA 3. (A) REPRESENTA UN DESLIZAMIENTO ROTACIONAL (B) REPRESENTA UN DESLIZAMIENTO TRASLACIONAL. (SKINNER & PORTER, 1992).....	14
FIGURA 4. PARTES DE UN DESLIZAMIENTO. (VARNES, 1978) .....	17
FIGURA 5. EFECTOS DE LA SATURACIÓN SOBRE UN TALUD. (DIAZ, 2012).....	20
FIGURA 6. CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA SUELOS CON DIFERENTES TEXTURAS (PEREZ, 2006).....	21
FIGURA 7. (A) CURVAS ESFUERZO DE CORTE-DESPLAZAMIENTO EN UN ENSAYO DE CORTE DIRECTO (DUNCAN Y WRIGHT, 2005) (B) ENVOLVENTES DE RESISTENCIAS PICO Y RESIDUAL MOHR-COULMB. (DIAZ, 2012) .....	22
FIGURA 8. ROTURA PLANA EN TALUD INFINITO. (DIAZ, 2012) .....	26
FIGURA 9. FUERZAS QUE ACTÚAN EN UNA SUPERFICIE DE ROTURA CURVA. (ALONSO, 2005) .....	27
FIGURA 10. DIVISIÓN DE UN DESLIZAMIENTO EN REBANADAS A FIN DE APLICAR EL MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE. (ALONSO, 2005) .....	28
FIGURA 11. FUERZAS SOBRE UNA REBANADA (ER, XR SON FUERZAS EN EL LADO DERECHO DE LA REBANADA Y EL, XL EN EL LADO IZQUIERDO) (ALONSO, 2005) .....	29
FIGURA 12. DIAGRAMA DE FUERZAS PARA UNA REBANADA UTILIZANDO EL MÉTODO ORDINARIO. ....	30
FIGURA 13. DIAGRAMA DE FUERZAS PARA UNA REBANADA UTILIZANDO EL MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO. ....	31
FIGURA 14. DIAGRAMA DE FUERZAS PARA UNA REBANADA UTILIZANDO EL MÉTODO DE JANBÚ GENERALIZADO. ....	32
FIGURA 15.1 MAPA TOPOGRÁFICO DE CERCS. (ICGC) 15.2 VISTA AÉREA DE CERCS (GOOGLE MAPS, 2015).....	37
FIGURA 16. MAPA GEOLÓGICO DE CERCS (ICGC) .....	38
FIGURA 17. LÍMITES DE ATTERBERG. (CEDEÑO RAMIREZ, 2014) .....	39
FIGURA 18. RELACIÓN ENTRE EL LÍMITE LÍQUIDO Y SU ÍNDICE PLÁSTICO. (CEDEÑO RAMIREZ, 2014) .....	39
FIGURA 19. ESTRATOS DEL SUELO DEBAJO DEL DESLIZAMIENTO. ....	40
FIGURA 20. VISTA EN PLANTA PARA LOS PERFILES ESCOGIDOS. (ICGC).....	43
FIGURA 21. SECCIÓN A-A' (ICGC) .....	43
FIGURA 22. SECCIÓN 1-1' (ICGC).....	44
FIGURA 23. SECCIÓN 2-2' (ICGC).....	44
FIGURA 24. SECCIÓN 3-3' (ICGC).....	44
FIGURA 25. SECCIÓN 4-4' (ICGC).....	45
FIGURA 26. UBICACIÓN SISTEMAS DE MONITOREO. (ICGC).....	46
FIGURA 27. ESTACIÓN METEO. ....	47
FIGURA 28A. LA FIGURA DE LA IZQUIERDA ES DATA LOGGER. FIGURA 28B. EL SENSOR DEL CONTENIDO DE AGUA. (DECAGON).....	48
FIGURA 29. SENSOR MPS-2 ( (DECAGON).....	48
FIGURA 30. PIEZÓMETRO GEONSENSE VWP-3200 (GEONSENSE).....	49
FIGURA 31. EXTENSÓMETRO ASM WS12-3000 (GMBH, 2016) .....	49
FIGURA 32. UBICACIÓN DE LOS SENSORES QUE CORRESPONDEN A LA ESTACIÓN SLOPE. ....	50
FIGURA 33. PRECIPITACIÓN DIARIA CORRESPONDIENTE AL 2015. ....	51
FIGURA 34A. FORMACIÓN DE LAGO EN LA CABECERA DEL COLUVIÓN. FIGURA 34B. UBICACIÓN LAGO CABECERA.....	53
FIGURA 35. RELACIÓN PRECIPITACIÓN DIARIA – POTENCIAL HÍDRICO CORRESPONDIENTE AL AÑO 2015. ....	54
FIGURE 36. TEMPERATURA DIARIA CORRESPONDIENTE AL AÑO 2015. ....	54
FIGURA 37. RELACIÓN PRECIPITACIÓN DIARIA – CONTENIDO DE AGUA VOLUMÉTRICA CORRESPONDIENTE AL AÑO 2015. ....	56
FIGURA 38. CURVA DE RETENCIÓN DEL SUELO PARA LOS SENSORES DE PROFUNDIDAD -23CM.....	57
FIGURA 39. CURVA DE RETENCIÓN DEL SUELO PARA LOS SENSORES DE PROFUNDIDAD -36CM.....	57
FIGURA 40. RELACIÓN PRECIPITACIÓN DIARIA - FLUCTUACIONES DEL PIEZÓMETRO CORRESPONDIENTE AL AÑO 2015. ....	58
FIGURA 41. RELACIÓN PRECIPITACIÓN DIARIA – DESPLAZAMIENTOS DE LA LADERA CORRESPONDIENTE AL AÑO 2015. ....	59
FIGURA 42. PRECIPITACIÓN HORARIA PARA EL DÍA 2 DE NOVIEMBRE DE 2015. ....	60
FIGURA 43. RELACIÓN PRECIPITACIÓN HORARIA – POTENCIAL HÍDRICO PARA EL 2 DE NOVIEMBRE DE 2015.....	60
FIGURA 44. RELACIÓN PRECIPITACIÓN HORARIA – CONTENIDO DE AGUA PARA EL 2 DE NOVIEMBRE DE 2015. ....	61
FIGURA 45. RELACIÓN PRECIPITACIÓN HORARIA – VARIACIÓN PIEZOMÉTRICA PARA EL 2 DE NOVIEMBRE DE 2015. ....	62
FIGURA 46. RELACIÓN PRECIPITACIÓN HORARIA – DESPLAZAMIENTOS DE LA LADERA PARA EL 2 DE NOVIEMBRE DE 2015.....	63

FIGURA 47. PRECIPITACIÓN HORARIA PARA EL DÍA 22 DE JULIO DE 2015. ....	64
FIGURA 48. RESPUESTA DEL SUELO CON RELACIÓN AL POTENCIAL HÍDRICO. ....	64
FIGURA 49. RESPUESTA DEL SUELO ANTE EL CAMBIO DEL CONTENIDO DE AGUA.....	65
FIGURA 50. REACCIÓN DEL SUELO CON RELACIÓN LA VARIACIÓN PIEZOMÉTRICA.....	66
FIGURA 51. REACCIÓN DEL SUELO CON RELACIÓN A UN DESPLAZAMIENTO. ....	67
FIGURA 52. MÁXIMA PRECIPITACIÓN DIARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO EN EL POTENCIAL HÍDRICO PARA EL SENSOR S.1 WP -23CM. ....	68
FIGURA 53. MÁXIMA PRECIPITACIÓN HORARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO DEL POTENCIAL HÍDRICO PARA EL SENSOR S.1 WP -23CM. ....	69
FIGURA 54. MÁXIMA PRECIPITACIÓN DIARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO EN EL POTENCIAL HÍDRICO PARA EL SENSOR S.2 WP -36CM	69
FIGURA 55. MÁXIMA PRECIPITACIÓN HORARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO DEL POTENCIAL HÍDRICO PARA EL SENSOR S.2 WP -36CM ....	70
FIGURA 56. MÁXIMA PRECIPITACIÓN DIARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO EN EL CONTENIDO DE AGUA PARA EL SENSOR S.1 VWC -23CM ....	70
FIGURA 57. MÁXIMA PRECIPITACIÓN HORARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO DEL CONTENIDO DE AGUA PARA EL SENSOR S.1 VWC - 23CM.....	71
FIGURA 58. MÁXIMA PRECIPITACIÓN DIARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO EN EL CONTENIDO DE AGUA PARA EL SENSOR S.2 VWC - 36CM.....	71
FIGURA 59. MÁXIMA PRECIPITACIÓN HORARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO DEL CONTENIDO DE AGUA PARA EL SENSOR S.2 VWC - 36CM.....	72
FIGURA 60. MÁXIMA PRECIPITACIÓN DIARIA CON RELACIÓN A LOS CAMBIOS REGISTRADOS POR EL PIEZÓMETRO.....	73
FIGURA 61. MÁXIMA PRECIPITACIÓN HORARIA CON RELACIÓN A LOS CAMBIOS REGISTRADOS POR EL PIEZÓMETRO.....	73
FIGURA 62. MÁXIMA PRECIPITACIÓN DIARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO EN LOS DESPLAZAMIENTOS. ....	74
FIGURA 63. MÁXIMA PRECIPITACIÓN HORARIA CON RELACIÓN AL CAMBIO EN LOS DESPLAZAMIENTOS. ....	74
FIGURA 64. DIVISIÓN DE ESTRATOS DENTRO DE LA MODELACIÓN. ....	78
FIGURA 65. FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DE CERCOS. ....	79
FIGURA 66. RELACIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE CON LA RESISTENCIA AL CORTE. ....	80
FIGURA 67. FACTOR DE SEGURIDAD PARA LAS ARGILITAS SATURADAS.....	81
FIGURA 68. RELACIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE CON LA RESISTENCIA AL CORTE. ....	82
FIGURA 69. FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA SATURACIÓN COMPLETA DEL TALUD.....	82
FIGURA 70. RELACIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE CON LA RESISTENCIA AL CORTE. ....	83
FIGURA 71. RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO DE ROZAMIENTO RESIDUAL Y EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA CONDICIÓN ACTUAL.....	84
FIGURA 72. RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO DE ROZAMIENTO RESIDUAL Y EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA SATURACIÓN DE LAS ARGILITAS ALTERADAS. ....	85
FIGURA 73. RELACIÓN ENTRE EL ÁNGULO DE ROZAMIENTO RESIDUAL Y EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA SATURACIÓN COMPLETA DEL TALUD.....	86
FIGURA 74. DISTRIBUCIÓN DEL NIVEL FREÁTICO UTILIZANDO LA MEDIA NORMALIZADA. ....	87
FIGURA 75. RELACIÓN ENTRE EL FACTOR DE SEGURIDAD Y EL NIVEL FREÁTICO.....	87



## 1. Introducción y objetivos

Los deslizamientos son movimientos de masa pendiente abajo con velocidades variadas que transportan tierra, material granular y vegetación. Por otro lado causan muchos daños cuando afectan zonas urbanas. Deslizamientos pequeños pueden recorrer el doble de la distancia del cual cayeron antes que se queden sin energía, sin embargo, cuando se habla de uno grande, estos pueden llegar a recorrer 20 veces la distancia de su caída, destruyendo hogares, instalaciones eléctricas y tuberías de agua potable. (Perkins, 2016)

Los deslizamientos son desencadenados por varios factores pero mayormente están relacionados a fuertes lluvias. El agua juega un factor importante debido a que una gran cantidad de deslizamientos ocurren en zonas tropicales, es decir, zonas donde la precipitación es muy elevada. Conociendo el comportamiento hidrogeológico de una ladera es posible predecir la ocurrencia del mismo.

Se reconoce que los deslizamientos provocados por la infiltración de agua precipitada son causados por el aumento de presión intersticial. El agua intenta rellenar los espacios vacíos entre las partículas de suelo y roca fisurada, que por la velocidad de filtración durante o poco después de cesar el periodo de lluvias intensas, provoca un aumento en la presión de poros que reducirá la tensión efectiva en suelos. (X.B. Tu, 2008)

El agua infiltrada en el suelo produce un cambio en la respuesta hidrogeológica que posee una ladera. De esta misma forma, el tiempo que tarda el suelo en responder ante un episodio de lluvia prolongada son características que conducen a un deslizamiento y requieren un estudio delicado. Esta respuesta puede ser rápida o puede tardar varios días. Es por esto que se necesita sistemas de medición continua anual para hacer comparaciones en episodios de grandes lluvias y las respuestas que pueda tener ante la infiltración.

Se han llevado a cabo una serie de experimentos de campo para estudiar los efectos de la infiltración de la lluvia y como pone en riesgo la estabilidad del talud, utilizando sistemas de monitoreo que recopilan datos hidrogeológicos necesarios para tener un análisis completo. Estos cuentan con un diseño de manera totalmente automatizada mediante sensores que registran, administran e informan sobre las oscilaciones en las tensiones que presenta el suelo con respecto al volumen de agua precipitada.

El presente estudio intenta interpretar los resultados obtenidos por el monitoreo del año 2015 y analizarlos con el fin de obtener una comprensión cuantitativa de cómo el proceso de infiltración de la lluvia, en un suelo no saturado, podría desencadenar el mecanismo de falla de una ladera. La zona de estudio está localizada en Cercs, en la comarca de Berguedà, Cataluña. El análisis considera la precipitación tomada en la zona, el contenido de agua del

suelo, las variaciones en las presiones intersticiales, los cambios en el nivel freático y posibles desplazamientos.

El objetivo general es analizar el comportamiento del suelo con relación a la infiltración y determinar las presiones intersticiales necesarias para provocar un deslizamiento superficial en la ladera de Cercs.

Los objetivos específicos son:

- Descripción de las condiciones geológicas, geomorfológicas y mecánicas de la zona de deslizamiento.
- Recopilación e interpretación de la respuesta del suelo con relación a la máxima precipitación diaria y la máxima precipitación horaria.
- Realización de un análisis de estabilidad con las condiciones existentes y bajo qué situaciones futuras se podría desencadenar un deslizamiento.

## 2. Marco Conceptual

### 2.1 Infiltración

Se conoce como infiltración a la entrada de agua en el suelo, sea lluvia o nieve derretida, a través de la interacción suelo-atmósfera. Esta se rige por la capacidad de infiltración del suelo para desplazar el agua al subsuelo, en donde se moverá gradualmente tanto de forma horizontal como vertical a las aguas subterráneas, de lo contrario se trasladaría por escorrentía superficial.

#### 2.1.1 Factores que afectan la infiltración

El factor principal que controla la infiltración es la precipitación. La intensidad y duración que esta pueda tener en forma de lluvia o nieve dicta que tanta agua pueda ser absorbida por el subsuelo. Las características del suelo juegan otro papel importante. El movimiento del agua es fuertemente influenciado por el tamaño de las partículas, textura y el tamaño de poros que esta pueda tener. La textura del suelo se compone de la cantidad de partículas de arena, limo y arcilla que contiene. La partícula más grande es la arena, seguida por la de limo y finalmente la arcilla, siendo la más pequeña. El agua se infiltra más rápido por los macroporos, encontrados en la arena. Contrario a las arenas, el agua en las arcillas es infiltrada de forma más lenta por microporos. (González de Vallejo, et al., 2002)

Cuando el suelo llega a una saturación por la lluvia prolongada, este no puede absorber agua de la misma forma que lo hacía cuando estaba seco. Si la tasa de aplicación de agua excede la capacidad de infiltración del suelo, el escurrimiento se produce sobre el mismo. (Williams JR, 1998). En las primeras etapas de la lluvia la tasa de infiltración es relativamente alta, como podemos ver en la Figura 1, hasta que el valor llega a ser igual al coeficiente saturado de permeabilidad.

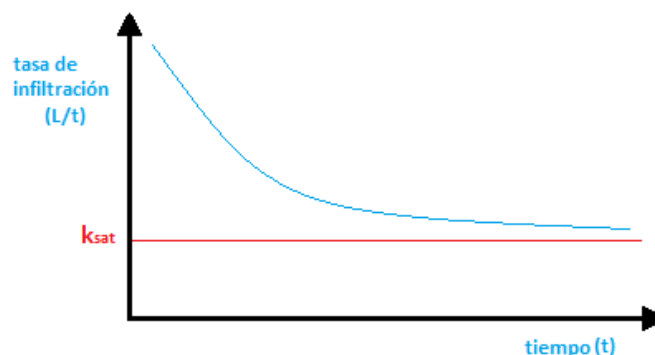


Figura 1. Tasa de infiltración del suelo hasta llegar la saturación.

La evapotranspiración tiene mucha influencia sobre la infiltración. El agua que las plantas necesitan es absorbida por sus raíces y la restante pasa al subsuelo en el caso de haber un excedente. La capa vegetal, por otro lado, puede frenar el movimiento superficial del agua, favoreciendo la infiltración. Contrario a esto, si el agua se encuentra sobre una pendiente, debido a que se desplaza por escorrentía superficial, presenta mayor dificultad para infiltrarse.

### 2.1.2 Proceso de infiltración por lluvia

Según Norum (1967) el proceso de infiltración de agua en la superficie terrestre se debe a la influencia combinada de las fuerzas de gravedad y capilares. Ambas fuerzas actúan en la dirección vertical para provocar la percolación hacia abajo. Las fuerzas capilares también actúan para desviar el agua lateralmente de poros más grandes (canales de alimentación) a los espacios de poros capilares que son mucho más pequeños en dimensión, pero pueden ser muy numerosos.

A medida que el proceso continúa, los espacios de los poros capilares se llenan de agua y por fuerza gravitacional se traslada a mayores profundidades, encontrándose normalmente con una mayor resistencia al flujo. Lo anterior puede ser causa de una disminución en el canal de flujo, un aumento de la longitud de los canales, o una barrera impermeable como roca o arcilla.

Durante el proceso de infiltración, puede haber aumento de resistencia ante la entrada de agua a la superficie del suelo por un efecto de sellado que ocurre por la acción mecánica, que corresponde a la descomposición de los agregados del suelo y posterior en el lavado de las partículas de suelo más finas. El resultado es una reducción rápida de la velocidad de infiltración en las primeras horas de una tormenta, logrando que la tasa permanezca casi constante durante el resto del episodio lluvioso. (Norum & Gray, 1967)

### 2.1.3 Ley de Darcy

La infiltración de agua en el suelo, como muchos otros flujos producidos en medios porosos, se rige por la ley de Darcy, obtenida a partir de la ecuación de continuidad de Richards:

$$v = -k \nabla \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1)$$

En donde:

- k → Conductividad hidráulica (m/s)
- h → Potencial hídrico (m)
- z → Distancia (m)

Se puede observar por medio de esta ecuación que la velocidad de un flujo en un punto arbitrario de suelo es directamente proporcional a la conductividad hidráulica del mismo y del gradiente hidráulico que presente el terreno.

Si examinamos esta ecuación para una infiltración por precipitación, sabiendo que el flujo se mueve tanto en la dirección vertical (z), como en la horizontal (x) debido a la capilaridad, las fórmulas se representarían de la siguiente forma:

$$q_x = -k \left( \frac{dz}{dx} + d \frac{p/\gamma_w}{dx} \right) \quad (2)$$

$$q_z = -k \left( \frac{dz}{dz} + d \frac{p/\gamma_w}{dz} \right) \quad (3)$$

En donde:

- $q_x$  → Flujo en la dirección horizontal (m/s)
- $q_z$  → Flujo en la dirección vertical (m/s)
- k → Conductividad hidráulica (m/s)
- p → Presión de agua en el suelo ( $F \cdot m^2$ , donde F es la fuerza)
- $\gamma_w$  → Peso específico del agua ( $kg/m^3$ )

De acuerdo con la Ley de Darcy, la velocidad del fluido depende de:

- La capilaridad del suelo para dirigir el agua
- El gradiente hidráulico: el potencial de energía para que el agua fluya de mayores alturas a menores por medio de una pendiente.

## 2.2 Movimientos de ladera

Un movimiento de ladera (*landslide, en inglés*) es definido como un movimiento pendiente abajo de masa de roca, escombros, tierra o suelo. (Meng, 2014)

Los deslizamientos de tierras pueden tener diversas clasificaciones según la base del movimiento y el tipo de material que traiga consigo. El material que compone la masa de un deslizamiento de tierra es roca, suelo o ambas. Cuando contiene una combinación de ambas, principalmente está compuesto de arena o partículas de tamaño más finas y también de residuos compuestos de fragmentos más gruesos. (Highland & Bobrowsky, 2008)

El estudio del peligro que causa un deslizamiento es de vital importancia para tener en cuenta la planificación o la adopción de medidas de mitigación apropiadas y así disminuir el riesgo de pérdidas y daños. El tipo de deslizamiento de tierra determinará la velocidad potencial de movimiento, volumen del material desplazado, distancia de recorrido y las medidas de mitigación apropiadas a ser consideradas. (Highland & Bobrowsky, 2008)

### 2.2.1 Tipología de movimientos de laderas

Según Highland & Bobrowsky (2008), los diferentes tipos movimiento de laderas se describen de la siguiente forma:

*Desprendimientos:* La masa rocosa, de tierra o ambas, se separa bruscamente de pendientes o acantilados. Esta tiende a romperse en el impacto o a rodar en las pendientes pronunciadas hasta que frene.

*Vuelcos:* La masa rocosa rota hacia adelante con un giro por debajo de su centro de gravedad. A veces los vuelcos son debido al agua o hielo en las grietas de la masa.

*Deslizamientos:* Un movimiento pendiente abajo de un suelo o de rocas que se comporta como una sola unidad.

*Expansión Lateral:* Se producen en pendientes suaves y en terrenos planos, donde una capa superior de roca o suelo se somete a extensión y se mueve por encima de una capa más débil.

*Flujos:* Un movimiento rápido de masa en el que suelo, roca y material orgánico se combinan con agua para formar un líquido viscoso pendiente abajo.

## 2.2.2 Deslizamientos

Cuando se trata de infiltración en sitios montañosos de pendientes pronunciadas, el agua tiende a reducir la fricción entre el lecho rocoso y los sedimentos que interactúan con el mismo, provocando que la gravedad desplace el terreno (Figura 2). El movimiento puede ser progresivo, en el sentido que no se inicia simultáneamente a lo largo de la superficie de falla, sino que se va generando en un proceso gradual. (Díaz, 2012)

Los deslizamientos son especialmente frecuentes en laderas inclinadas, entre 20 y 50 grados, con formaciones geológicas poco resistentes y cohesivas (lutitas arcillosas, margas, etc.). También son frecuentes en laderas formadas por rocas estratificadas con intercalaciones de capas delgadas de arcillas o lignitos. (Copons Llorens & Tallada Masquef, 2009)

Las velocidades de desplazamiento son desde extremadamente lentas (menos de un centímetro por año) hasta moderadamente rápidas (varios metros por día). Suelen causar importantes daños materiales en urbanizaciones y tramos de la red viaria, pero su efecto mortal suele ser bajo. (Copons Llorens & Tallada Masquef, 2009)

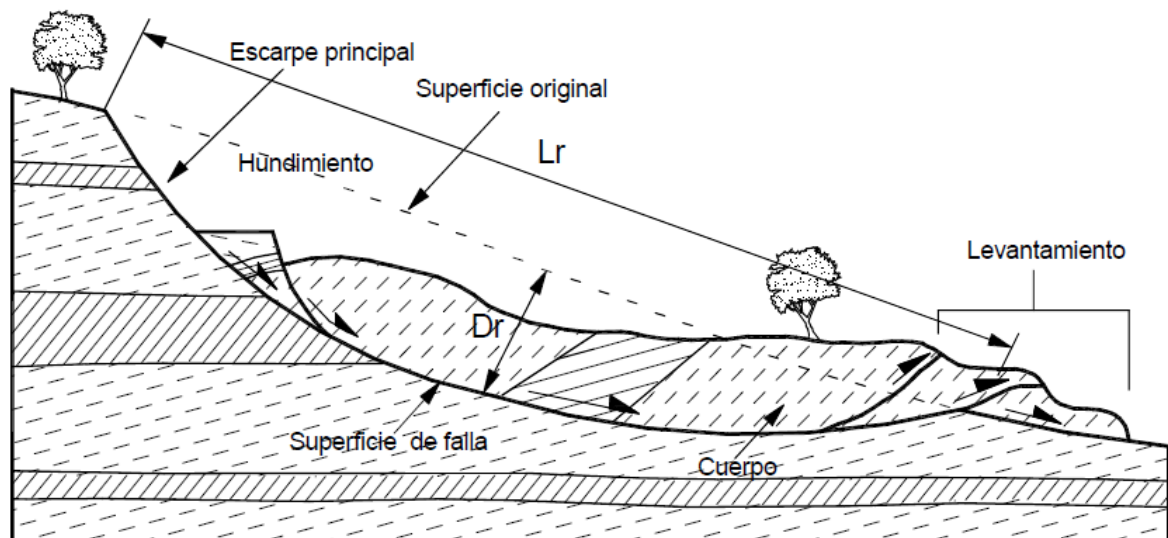


Figura 2. Ilustración del movimiento de masa que presenta un deslizamiento. (Díaz, 2012)

### 2.2.3 Clasificación de un deslizamiento

Los deslizamientos de masa pueden ser subdivididos en rotacionales, traslacionales y compuestos (presenta características de ambos). Su importancia se debe a que dicha subdivisión rige el sistema de análisis que conlleva y el método de estabilización correspondiente.

*Deslizamiento rotacional:* Se produce cuando un bloque, compuesto por sedimentos o roca, se desliza a lo largo de una superficie cóncava hacia afuera en un eje paralelo a la pendiente. El centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del bloque desplazado. Los deslizamientos rotacionales suceden en suelos homogéneos y debido a su facilidad de análisis son el tipo más estudiado.

*Deslizamiento traslacional:* También conocido como deslizamiento planar, se produce cuando la masa se desplaza a lo largo de la superficie con movimientos de poca rotación. Estos tienden a convertirse en flujo cuando la pendiente tiene inclinaciones importantes.

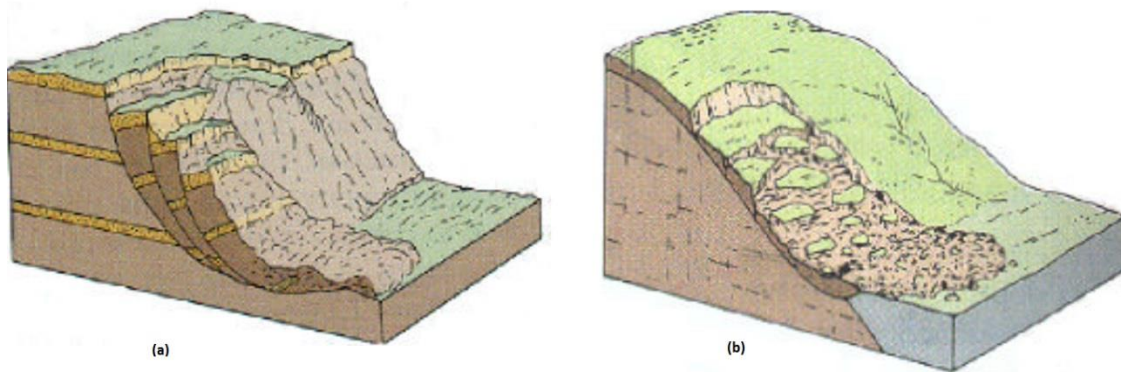


Figura 3. (a) Representa un deslizamiento rotacional (b) Representa un deslizamiento traslacional. (Skinner & Porter, 1992)



## 2.2.4 Factores que afectan un deslizamiento.

Según Díaz (2012) para comprender como se produce un deslizamiento es importante tener conocimientos sobre los factores que intervienen en el mismo. A continuación se explicarán brevemente los factores que afectan directamente a un deslizamiento.

### *Litología*

El material que compone una ladera posee características propias para las condiciones en que se encuentre. Aunque dos formaciones geológicas estén bajo condiciones similares, desarrollarán características distintas de perfil geotécnico y presentarán un comportamiento diferente como resultado de las diversas características de los materiales.

### *Microestructura*

Así como cada material posee propiedades intrínsecas, su microestructura es definida para cada partícula. La fábrica y textura son las propiedades que definen su ángulo de reposo.

### *Fracturas*

Las discontinuidades actúan como conductores de agua logrando un aumento de presión de poro dentro de la ladera. Por otro lado, debilita las paredes mediante la meteorización y se almacenan materiales blandos dentro de la junta.

### *Geomorfología*

El estudio de las formas que presenta la superficie terrestre y los procesos que las generan son importante para recrear un modelo de su comportamiento. Cuando se intenta hacer un análisis sobre la misma, es necesario conocer qué procesos actúan sobre el talud, cómo ha cambiado desde su inicio y cómo puede afectar en un futuro.

### *El clima y la hidrología*

Los procesos de meteorización en una ladera son afectados por las diferentes condiciones climáticas, es decir por la presencia o escasez de agua. Debido a lo anterior, los taludes presentan modificaciones en sus fuerzas actuantes.

### *La hidrogeología*

Es importante conocer las zonas de infiltración en la parte superior del talud, parámetros hidráulicos como la conductividad (definida como la facilidad por el cual el agua se desplaza por un material) y la capacidad de almacenamiento de agua en una ladera.

### *La capa vegetal*

La vegetación que cubre la superficie de la ladera sirve como una protección contra la erosión y afecta directamente la infiltración del agua por medio de la evapotranspiración. Esta también, por medio de raíces, refuerza el suelo.

### *La pendiente o relieve*

La pendiente en una ladera afecta la estabilización que esta tenga. Si su inclinación aumenta, las fuerza desestabilizadores del talud también. Cuando se trata de su relieve, conocer la curvatura que esta tenga es muy importante para un análisis de estabilidad (conocer su factor de seguridad).

### *Modificaciones hechas por el hombre (efecto antrópico)*

Cualquier actividad como la construcción, agricultura, irrigación y desmontes afectan negativamente la estabilidad de un talud y produce cambios en la distribución de fuerzas actuantes estabilizadoras que tenía un talud.

## **2.2.5 Partes principales de un deslizamiento**

En la Figura 4 se muestra un deslizamiento típico. Las partes principales de este son las siguientes (Varnes, 1978):

*Cabeza:* La parte superior de la masa del material en movimiento.

*Corona:* Sector de la ladera que no ha fallado, localizado por encima del deslizamiento.

*Cima:* El punto más alto de la cabeza.

*Punta:* El punto de la base con mayor distancia de la cima.

*Escarpe principal:* Superficie con pendiente muy inclinada localizada en el límite del desplazamiento y originada por el material desplazado de la ladera.

**Escarpe secundario:** Superficie de pendiente fuerte originada por el desplazamiento diferencial dentro de la masa en la que se mueve.

**Superficie de falla:** Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado.

**Cuerpo principal del deslizamiento:** El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla.

**Pie de la superficie de la falla:** línea de intercepción entre la parte inferior de la superficie de rotura y la original

**Base:** Área cubierta por el material perturbado debajo del pie de la superficie de falla.

**Superficie original del terreno:** La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

**Costado:** Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.

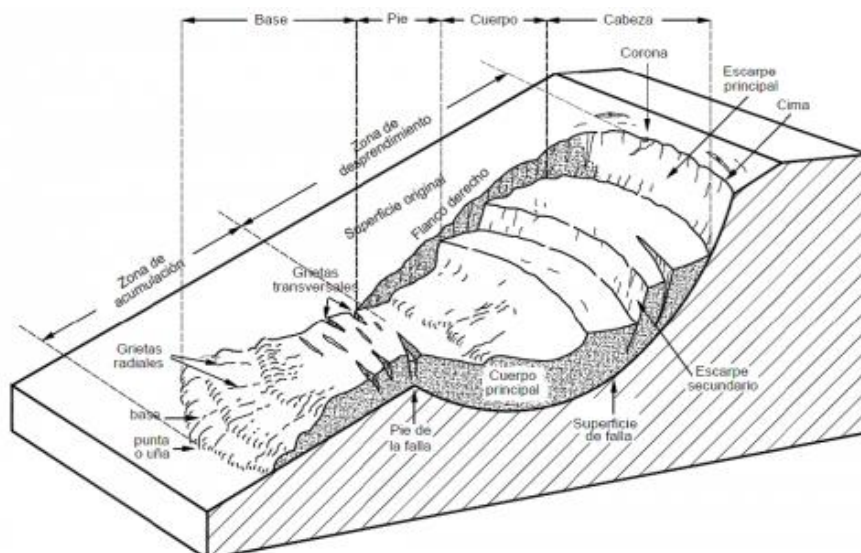


Figura 4. Partes de un deslizamiento. (Varnes, 1978)

## 2.2.6 Mecanismo de activación

En una ladera debe haber un equilibrio entre las fuerzas actuantes y las resistentes, es decir, las que tienden a producir el movimiento y las tienden a resistirlo.

Los materiales que componen una ladera se encuentran sometidos a compresión, generan un esfuerzo cortante y sufren deformaciones que van aumentando con el tiempo. Para que se produzca una falla, debe haber tanto un aumento en el esfuerzo cortante como una disminución en la resistencia a cortante. (Terzaghi, 1950)

### 2.2.6.1 Formación de falla en una ladera

Las principales deformaciones que sufre una ladera se concentran en la superficie de falla, en el cual al pasar el tiempo su rotura va progresando. La falla progresa porque hay puntos dentro de la superficie que fallan primero que otros y luego se redistribuyen los esfuerzos a los demás puntos (Pathak et al, 2008; Cramer, 2003). Al fallar un punto arbitrario, ocasiona que la resistencia al corte disminuya y se vuelva la residual, poniendo en peligro los otros puntos por la redistribución de esfuerzos y causando que estos superen la resistencia máxima de los mismos. (Díaz, 2012)

A medida que la longitud de falla aumenta, la superficie que no ha fallado va reduciendo hasta llegar el punto que la misma empieza a aumentar hiperbólicamente. (Kilburn y Petley, 2003)

### 2.2.6.2 Superficie de falla

Según Díaz (2012), al fallar la superficie completa que se encontraba resistiendo tanto la parte por encima de la fractura como la que se encuentra por debajo de la misma, se produce lo que se conoce como superficie de falla. Dentro de ella las partículas se mueven independientemente de forma similar a un flujo, es decir con materiales más sueltos y una porosidad superior.

Como se mencionó anteriormente en los factores que afectan un deslizamiento, la microestructura del mismo se ve afectada. Las partículas se muestran desarregladas, heterogéneas y débiles. La superficie de falla se encuentra deformada por dilatación, lo cual facilita la deformación por cortante.

### 2.2.6.3 Resistencia al corte de los suelos y la succión

La gran mayoría de deslizamientos o fallas en laderas están relacionadas con el agua. Consigo trae un aumento en el peso del material, una disminución en la resistencia y un aumento en la presión de poro.

La precipitación desencadena movimientos de masas (deslizamientos), tanto rotacional como traslacional luego de infiltrarse al suelo, elevando las presiones de aguas subterráneas y presiones de aire ( $p_w$ ) y ( $p_a$ ) respectivamente. (Gostelow, 1991)

Para comprender el significado en los cambios de presión que corresponden a la estabilidad de una ladera, dos aspectos en suelos no saturados deben ser apreciados:

- (a) El primero siendo los componentes de los esfuerzos.
- (b) El segundo siendo el flujo del agua en un suelo no saturado.

La resistencia al cortante para suelos no saturados puede ser expresada utilizando el criterio Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma - p_w)\tan\phi' + (p_a - p_w)\tan\phi_b \quad (4)$$

En donde:

- $\tau$  → Esfuerzo cortante
- $c'$  → Cohesión del suelo
- $(\sigma - p_w)$  → Tensión efectiva
- $(p_a - p_w)$  → Succión matricial o presiones negativas
- $\phi'$  → Angulo de rozamiento interno
- $\phi'_b$  → Angulo de rozamiento interno con respecto a la succión matricial en suelos no saturados

Si se interpreta la Ecuación (4), la resistencia al cortante es afectada por la cohesión del suelo, la tensión efectiva, compuesta de la tensión total menos la presión de agua y por último la succión matricial, correspondiendo a la presión de aire menos la presión de agua. El significado de la ecuación del esfuerzo cortante para suelos no saturados se debe a que el componente de succión matricial o potencial de agua es una función de las presiones de agua negativas en los suelos.

La succión es definida como la energía requerida por unidad de agua para transportar una cantidad infinitesimal a una muestra de agua libre. Básicamente es la energía necesaria para extraer la cantidad de agua en el terreno y su valor es siempre negativo, de lo contrario un valor positivo sería expulsar agua fuera del suelo. En los suelos es reducida por la infiltración

de la precipitación, la cual incrementa la presión de agua en los poros y a la vez reduce su esfuerzo cortante. La saturación en los suelos por encima de la zona vadosa conduce a una masa de suelo más pesada, aumentando así las cargas de una ladera en peligro de fallar. (Siew-Ann, et al., 2007)

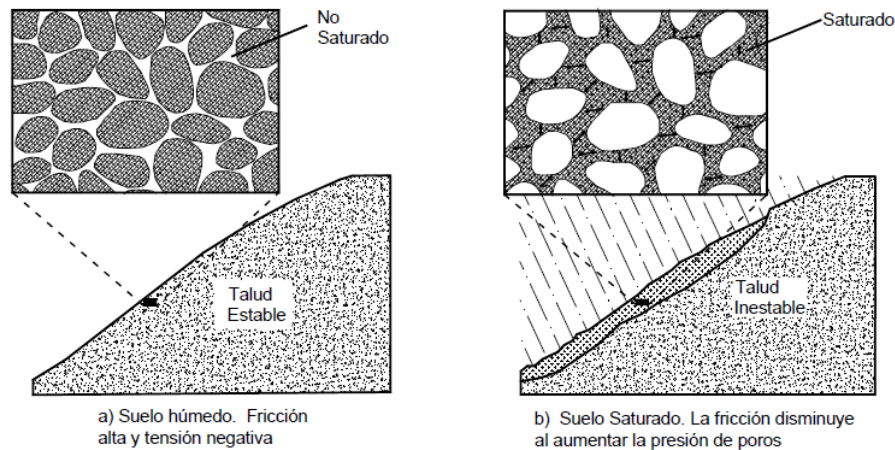


Figura 5. Efectos de la saturación sobre un talud. (Diaz, 2012)

En la Figura 5 se puede observar el efecto del agua sobre una ladera. A medida que el terreno se va saturando, la succión va disminuyendo y por lo tanto la resistencia del suelo se ve afectada. Es por esto que los deslizamientos suelen ocurrir en épocas de lluvias donde la succión que le aportaba resistencia y estabilidad al suelo se ve disminuida o puede hasta desaparecer.

Debido a que los poros se encuentran llenos de agua, impidiendo que haya una presión de aire, la formula se representa:

$$\tau = c' + (\sigma - p_w) \tan \phi' \quad (5)$$

#### 2.2.6.4 Contenido de agua

El contenido de agua puede ser expresado de dos formas, una siendo el contenido de agua volumétrica, definido como el volumen de agua entre el volumen total de la muestra y la otra siendo el contenido de agua gravimétrica, expresada como la masa del agua entre la masa de las partículas secas. Las dos guardan una relación al momento de obtenerlas ya que en un laboratorio la forma más práctica de obtener el contenido de agua es la gravimétrica, mientras que los ensayos in situ solamente determinan el contenido de agua volumétrica.

En los suelos no saturados, la respuesta del suelo puede ser representada por el cambio que hay en el contenido de agua. Por medio de una curva característica o curva de retención se puede visualizar gráficamente la capacidad que tiene el suelo para retener el agua, como puede observarse en la Figura 6.

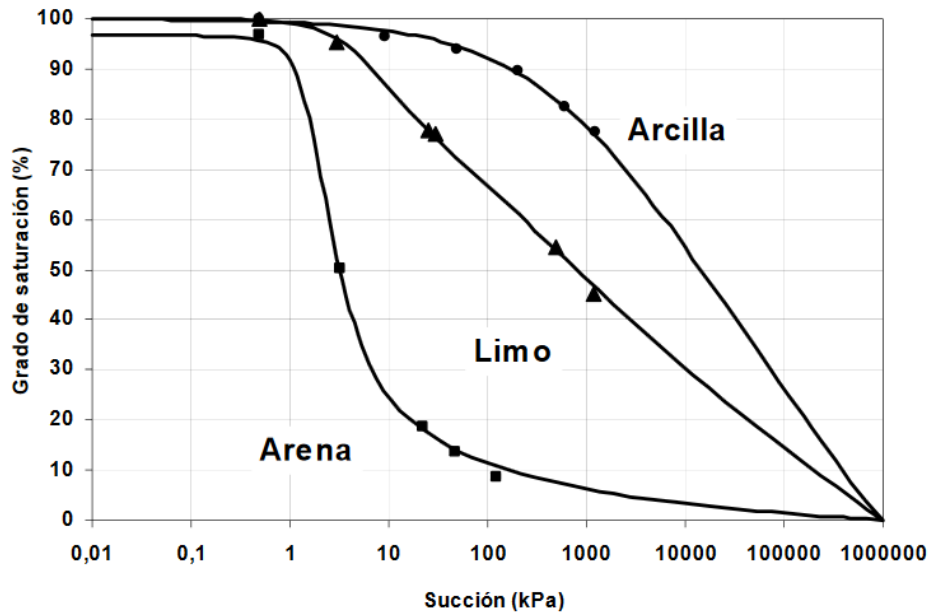


Figura 6. Curvas características para suelos con diferentes texturas (Perez, 2006)

### 2.2.6.5 Variaciones en el nivel freático

La lluvia puede provocar un ascenso en el nivel freático y una desestabilización en la superficie. Las presiones de poros mayores que la atmosférica son positivas y se encuentran por encima del nivel freático. Las presiones negativas, menores que la atmosférica, se encuentran por debajo del nivel freático. De esta forma, cuando el nivel freático aumenta, la succión tiende a desaparecer debido a la saturación.

### 2.2.6.6 Parámetros Resistentes del Suelo

Para un análisis de estabilidad es necesario conocer los parámetros que definen la resistencia al cortante relacionados con el criterio Mohr-Coulomb. Sus principales componentes son: el ángulo de rozamiento interno ( $\phi'$ ) y la cohesión ( $c'$ ). En esta sección se intentará ampliar los conocimientos sobre estos parámetros y como se relacionan al presente informe.

*Angulo de rozamiento interno ( $\phi'$ ):* Este es la representación de forma matemática del coeficiente de rozamiento que tiene un suelo, siendo un parámetro intrínseco del suelo y que

depende del tamaño de la partícula, estructura, distribución de los granos y su densidad. (Bilz, 1995)

**Cohesión ( $C'$ ):** Esta es la fuerza adherente que une las partículas del suelo y representa la resistencia máxima a tensión. Cuando se trata de suelos con saturación parcial, el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión y a este se le llama *cohesión aparente*.

Desde el punto de vista de la relación esfuerzo – deformación, en la estabilidad de taludes se deben tener en cuenta dos tipos de resistencia (Diaz, 2012):

**Resistencia máxima:** Es la máxima resistencia al corte que tiene un material que aún no ha fallado, correspondiendo al punto más alto de la curva esfuerzo-deformación. En el análisis de estabilidad de taludes se asume que la resistencia pico se obtiene simultáneamente a lo largo de la superficie de falla.

**Resistencia residual:** Se trata de la resistencia al corte que posee el material después de haber fallado.

En suelos dúctiles, la resistencia pico tiende a ser muy similar a la resistencia residual mientras que en los suelos frágiles que ya han fallado, la resistencia pico disminuye significativamente a la residual, como muestra la Figura 7a. La resistencia se pierde al momento de fallar, estando directamente relacionado con la cohesión. El ángulo de fricción, aunque disminuye, no es afectado en forma substancial, representado en la Figura 7b. (Diaz, 2012)

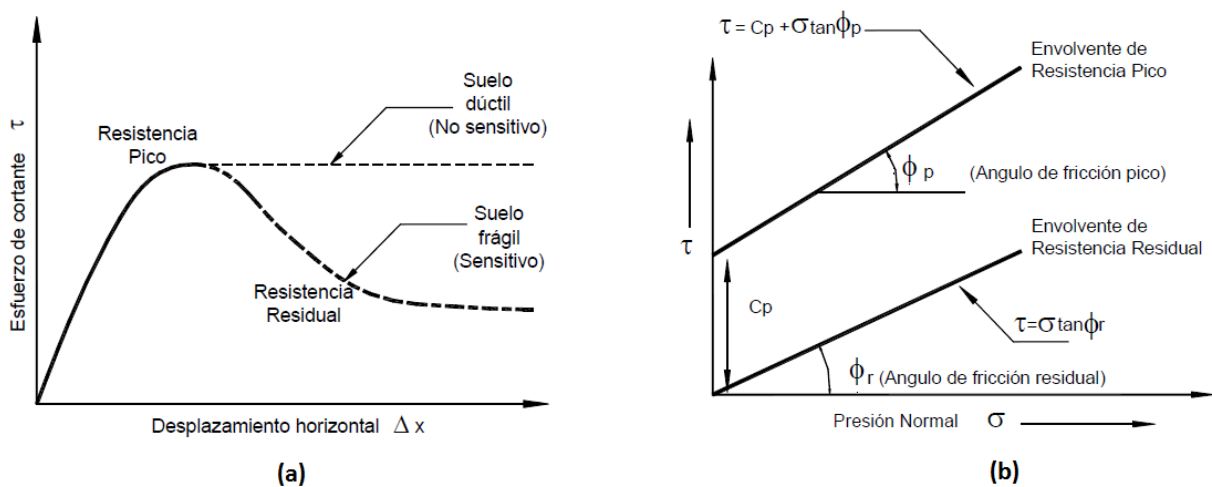


Figura 7. (a) Curvas esfuerzo de corte-desplazamiento en un ensayo de Corte directo (Duncan y Wright, 2005) (b) Envolventes de resistencias pico y residual Mohr-Coulomb. (Diaz, 2012)



Según González de Vallejo, et al. (2002), si se obtiene una representación de este en un plano de coordenadas  $(\sigma', \tau)$ , en el cual  $(c', \phi')$  da lugar a la línea de resistencia, se observa que:

- a) Cuando el círculo, representación del estado tensional, no alcanza la envolvente de rotura, este se encuentra en un estado seguro debido a que el suelo no ha roto.
- b) Cuando el círculo, representación del estado tensional, alcanza la envolvente de rotura en un punto cualquiera  $(\sigma_f', \tau_f)$ , este indica una situación de rotura.

Para poder interpretar la falla por esfuerzo cortante en una ladera se debe tener en cuenta la dirección de los esfuerzos principales siendo vertical en la parte superior del talud y horizontal en la parte inferior. Se entiende que para alcanzar una situación de rotura representado por el círculo de Mohr su estado tensional será tangente a la línea de resistencia y el plano a favor del cual se alcanzan las condiciones de rotura será representado por el punto de tangencia. (González de Vallejo, et al., 2002)

## 2.3 Análisis de estabilidad

Según González de Vallejo, et al. (2002), los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando una ladera presenta problemas de inestabilidad. De esta forma, cuando se tiene una ladera inestable, se permite confeccionar diseños como medidas de corrección y estabilización con el fin de evitar futuros desplazamientos.

Según Díaz (2012), la modelación matemática de los taludes es la rama de la ingeniería geotécnica que analiza las condiciones de estabilidad y seguridad en taludes naturales. Está comprendida de diversos métodos para la modelación matemática, los cuales dependen de que se pretende analizar y los resultados que se desean obtener. Sus principales objetivos son los siguientes:

- *Determinar si el talud se encuentra en condiciones estables.*
- *Investigar los mecanismos de falla.*
- *Determinar la susceptibilidad de los taludes a diferentes mecanismos de activación.*

Según Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes (2013), el tipo de análisis que estudia el mecanismo que provoca un movimiento de ladera, por medio de un modelo y una geometría asignada se conoce como *back-analysis*. Para este se hace una caracterización geomecánica de los materiales involucrados con fin de conocer que factores influyen en la rotura y el comportamiento mecánico de los materiales. Con estos análisis se determinan a partir de los datos de terreno necesarios (geometría, tipo de materiales, modelo de rotura, presiones hidrostáticas, entre otros), los parámetros resistentes del terreno y los pares de valores ( $c'$ ,  $\phi'$ ) que cumplan con la condición de equilibrio para las condiciones reales en la que tuvo lugar.

Según Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes (2013), los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento fisicomatemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud. Las anteriores se encargan de determinar su comportamiento y condición de estabilidad. Se pueden agrupar en:

**Métodos determinísticos:** Estos métodos consisten en seleccionar los valores adecuados de los parámetros físicos y resistentes que controlan el comportamiento del material para a partir de ellos y de las leyes de comportamiento adecuadas, definir el estado de estabilidad o el factor de seguridad del talud. Existen dos grupos: métodos de equilibrio límite y métodos tenso-deformables.

*Métodos probabilísticos:* Estos consideran la probabilidad de rotura de un talud bajo unas condiciones determinadas. Como su nombre lo indica, se consideran valores aleatorios en los análisis, lo que causa grandes dificultades al tener una gran cantidad de datos y se realizan a partir de ellos cálculos de seguridad mediante procesos iterativos.

### 2.3.1 Método de equilibrio límite

Según González de Vallejo, et al. (2002), los métodos de equilibrio límite son los más utilizados por su sencillez y aproximación a la realidad. Estos analizan el equilibrio de una masa inestable basándose en la selección de una superficie teórica de rotura en el talud, el criterio de Mohr-Coulomb y en un coeficiente de seguridad.

Para que se cumpla la hipótesis de este método, González de Vallejo et al. (2002), establece que la superficie de rotura debe ser postulada con una geometría tal que permita que ocurra un deslizamiento, que la distribución de las fuerzas actuando sobre la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos y que la resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo del plano de rotura - proporcionando el factor de seguridad (FS) del talud para la superficie analizada referido a las fuerzas actuantes:

$$FS = \frac{\text{fuerzas estabilizadoras}}{\text{fuerzas desestabilizadoras}} = \frac{\text{tensiones tangenciales resistentes}}{\text{tensiones tangenciales deslizadoras}} \quad (6)$$

Según González de Vallejo et al. (2002), para el cálculo del coeficiente de seguridad por equilibrio límite existen varios métodos. Los métodos analíticos proporcionan el coeficiente de seguridad a partir de la resolución inmediata de ecuaciones simples, mientras que los métodos numéricos necesitan sistemas de ecuaciones y procesos de cálculo iterativo.

Para analizar la estabilidad de un talud frente a la rotura se clasifican en tres tipos:

- Análisis de roturas planas en taludes infinitos
- Análisis de la masa total deslizante
- El método de rebanadas

### 2.3.1.1 Análisis de roturas planas en taludes infinitos

Este método es utilizado generalmente en movimientos traslacionales. Está basado en que la longitud de una rotura plana superficial paralela al talud puede ser considerada infinita con respecto al espesor deslizado. Se analiza lo que sucede en una sección del talud sometida a sus empujes laterales y peso propio, como se aprecia en la Figura 8. El peso propio del mismo provoca un empuje tangencial, generando un mecanismo de rozamiento en la base que se opone al deslizamiento, siendo el ángulo  $\beta$  la inclinación de la superficie y correspondiendo al criterio de Mohr-Coulomb para el factor de seguridad (FS) a continuación (Diaz, 2012):

$$FS = c' * \frac{(\gamma z - \gamma_w h) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (7)$$

Siendo:

- La cohesión,  $c'$  (kN/m<sup>2</sup>)
- El peso específico,  $\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>)
- La altura de la masa deslizando,  $z$  (m)
- Altura del agua subterránea medida durante el movimiento,  $h$  (m)
- Pendiente del talud,  $\beta$

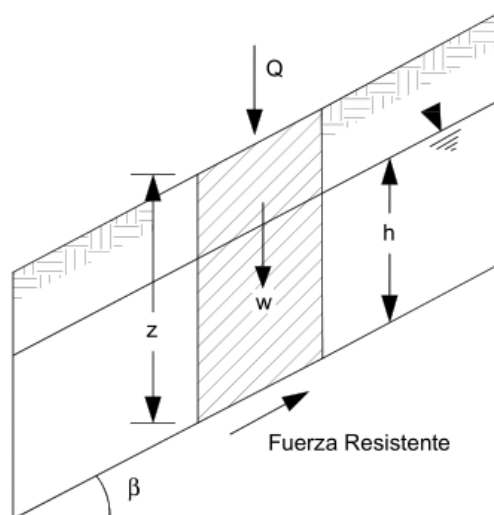


Figura 8. Rotura plana en talud infinito. (Diaz, 2012)

### 2.3.1.2 Análisis de la masa total deslizante (Método de Taylor)

La utilización de superficies de rotura circulares en dos dimensiones es una hipótesis muy utilizada en la práctica y representa el problema real en taludes de altura finita, siempre y cuando no existan zonas de terreno que definan claramente el desarrollo de superficies de rotura (González de Vallejo, et al., 2002). Estos métodos consideran que la masa total se desplaza uniformemente como un solo bloque, como se muestra en la Figura 9.

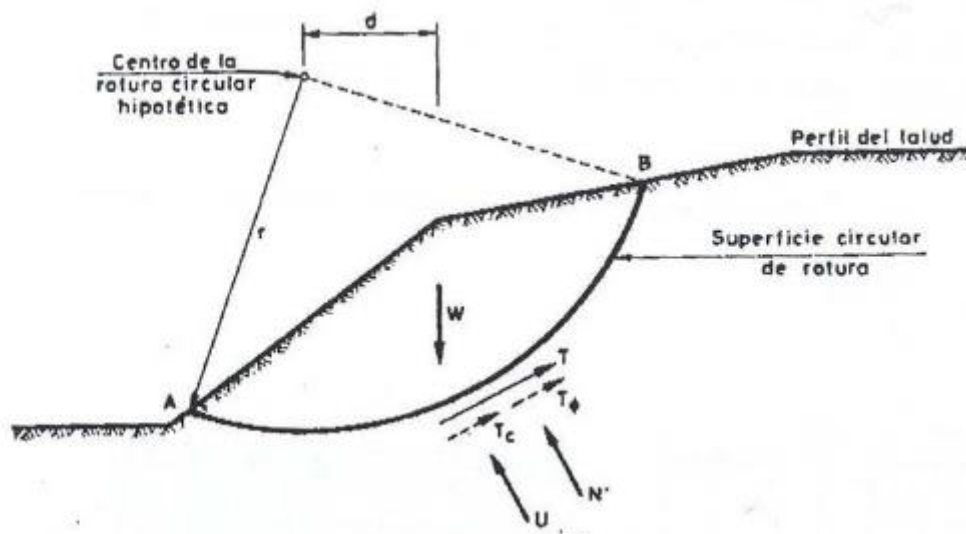


Figura 9. Fuerzas que actúan en una superficie de rotura curva. (Alonso, 2005)

En donde las fuerzas que actúan sobre la superficie de rotura son:

- El propio peso de la masa deslizada,  $W$
- La presión intersticial distribuida a lo largo de la superficie de rotura,  $U$
- El esfuerzo tangencial,  $T$  ( $T_c + T_\phi$ )
- Tensión normal,  $N$

### 2.3.1.3 Método de rebanadas

Según Alonso (2005), los métodos basados en el círculo de rozamiento proporciona valores relativamente bajos e inexactos y solo son aplicables para suelos homogéneos. Estos están tabulados para geometrías sencillas y pueden servir para tener una idea general del terreno. Por otro lado, cuando el terreno presenta características heterogéneas y además existen movimientos del agua en su interior, el método de cálculo más adecuado es el método de las rebanadas. Se basa en dividir la masa deslizada en distintas secciones verticales que se comportan como un sólido rígido. La masa desplazada queda subdividida, en no menos de 10-15 rebanadas y en cada subdivisión se impone las condiciones de equilibrio, como se aprecia en la Figura 10.

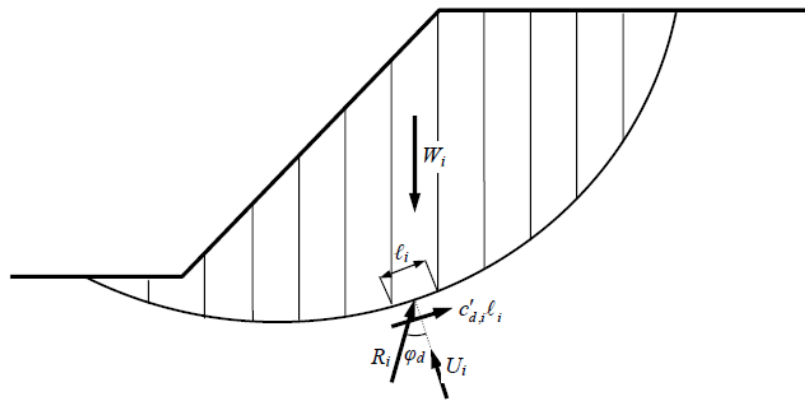


Figura 10. División de un deslizamiento en rebanadas a fin de aplicar el método de equilibrio límite. (Alonso, 2005)

Alonso (2005) también plantea que por medio de este método, las aproximaciones de la distribución de tensiones normales sobre la superficie de falla son mejores y se verá afectada por la altura que corresponda a cada rebanada. Otra gran ventaja de dicho método es que facilita el análisis en situaciones que el terreno no presenta homogeneidad, de manera que solo es necesario definir las rebanadas que se utilizarán para ese terreno. Cabe destacar que se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes respecto al centro del círculo para cada rebanada. En la Figura 11, se detallan las fuerzas que intervienen en cada rebanada.

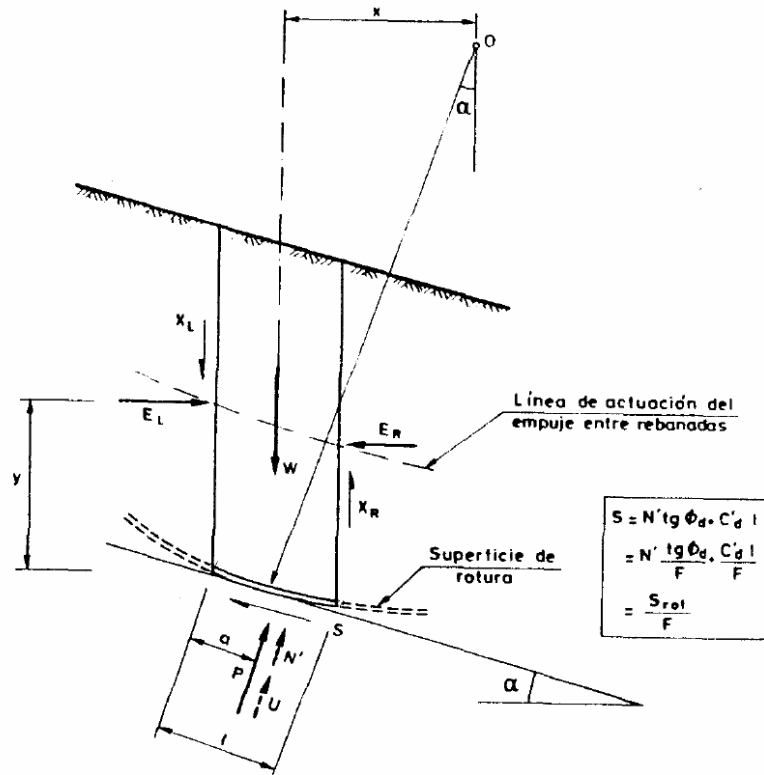


Figura 11. Fuerzas sobre una rebanada ( $E_R$ ,  $X_R$  son fuerzas en el lado derecho de la rebanada y  $E_L$ ,  $X_L$  en el lado izquierdo) (Alonso, 2005)

En la actualidad existen métodos de rebanadas más modernos que intentan simplificar más las fuerzas que intervienen entre cada rebanada y que establecen hipótesis diferentes. Estos métodos tienen algún tipo de inconveniente que se diferencia del otro, resultando de mayor utilización el método simplificado de Bishop para roturas circulares. Como desventaja, tiende a presentar problemas para presiones intersticiales altas y rozamientos elevados. (González de Vallejo, et al., 2002)

Los métodos de rebanadas pueden clasificarse en dos grupos: en métodos *aproximados* que no cumplen todas las ecuaciones de la estática y en métodos *precisos*, que contrario a los anteriores, cumplen todas. Estos analizan numerosas superficies de rotura, circulares o no circulares, mediante los métodos de equilibrio límites aproximados y exactos. Debido al número elevado de cálculos, es necesario la utilización de programas computarizados. A continuación se explica brevemente las características de los métodos de las rebanadas más utilizados. (Aryal, 2006)

### Método ordinario o Fellenius

El método ordinario satisface el equilibrio de momento para una superficie de deslizamiento circular, pero descuida las fuerzas horizontales y cortantes entre las rebanadas, como se muestra en la Figura 12. Sin embargo, este es uno de los procedimientos más simples basado en el método de las rebanadas, puesto que la ecuación no requiere un proceso de iteración.

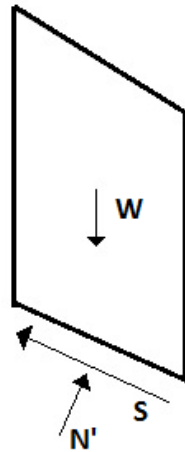


Figura 12. Diagrama de fuerzas para una rebanada utilizando el método ordinario.

Siendo:

- Fuerzas resistentes (cohesión y ángulo de fricción),  $S$
- Peso propio,  $W$
- Fuerza normal,  $N'$

### Método de Bishop

Es un método de rebanadas desarrollado en 1955, siendo el más usado en la práctica. Parte de un procedimiento diferente y da resultados distintos en comparación con el método ordinario. El análisis se realiza en términos de tensiones en lugar de fuerzas (utilizadas en el método ordinario anteriormente explicado). Este parte de las siguientes hipótesis (González de Vallejo, et al., 2002):

- Se supone una superficie circular.
- La masa deslizante se divide en  $n$  rebanadas verticales.
- Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada con respecto al centro del círculo.



- A partir de la condición de equilibrio de fuerzas verticales en cada rebanada se obtienen las fuerzas  $N$  (normales a la superficie de rotura) y se sustituyen en la ecuación resultante de equilibrio de momentos.
- Supone que las fuerzas de contacto entre cada dos rebanadas no influyen, por estar equilibradas.

Con el método de *Bishop simplificado*, las fuerzas laterales  $E$  que actúa sobre los lados de las rodajas entran en el análisis, pero supone que las fuerzas laterales de cortante pueden despreciarse sin inducir un error grave al análisis (Figura 13). Sin embargo, el método de *Bishop riguroso*, a diferencia del anterior, considera las fuerzas laterales entre las rebanadas, además de las fuerzas cortantes. El método también satisface momento de equilibrio en cada rebanada.

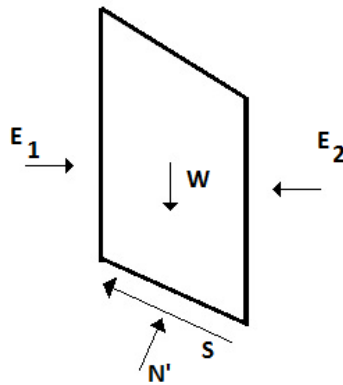


Figura 13. Diagrama de fuerzas para una rebanada utilizando el método de Bishop simplificado.

### Método de Janbú

Janbú cuenta con dos variedades del método: uno simplificado, desarrollado en el año 1954 y otro generalizado, desarrollado en 1968. Las diferencias fundamentales en estos métodos se resumen brevemente a continuación.

#### a) Método Janbú simplificado

Como en método de Bishop, este considera las fuerzas horizontales  $E$  entre las rebanadas y descuida la fuerza cortante, pero introdujo un factor de corrección ( $f_o$ ) en el factor de seguridad (FS) original para acomodar los efectos de las fuerzas cortantes entre rebanadas, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_f = f_o \cdot FS \quad (8)$$

b) *Método Janbú generalizado*

Este es el primer método que satisface tanto la fuerza y el momento de equilibrio. La fuerza normal en la base se convierte en una función de la fuerza cortante entre rebanadas (Nash, 1987). Como se aprecia en la Figura 14, este método considera ambas fuerzas entre las rebanadas, siendo  $E$  (fuerzas horizontales entre rebanadas) y  $T$  (fuerza de cortante entre rebanadas), satisfaciendo tanto a equilibrio de fuerzas como el de momento. Al ser un método avanzado de equilibrio límite, habilita el análisis en superficies de fallas y geometrías más complejas.

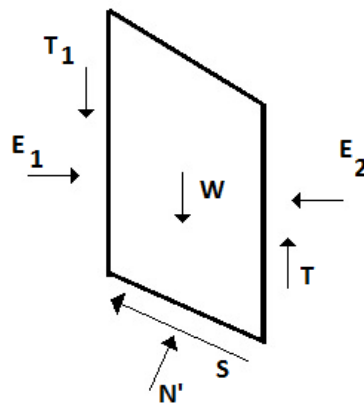


Figura 14. Diagrama de fuerzas para una rebanada utilizando el método de Janbú generalizado.

*Método de Morgenstern-Price*

Este método, al igual que Janbú generalizado, satisface tanto el equilibrio de fuerzas como el de momento. La fuerza cortante entre rebanadas varía con la función:

$$T = f(x) \cdot \lambda \cdot E \quad (9)$$

Donde:

- $f(x)$  → Función de la fuerza entre rebanadas que varía continuamente en la superficie de deslizamiento.
- $\lambda$  → Factor de escala para la función asumida.

El método asume cualquier tipo de función de fuerza de acuerdo con la geometría asignada. La relación entre la fuerza normal en la base y las fuerzas entre rebanadas son igual a las de Janbú generalizado.

#### *Método de Spencer*

Este método, desarrollado en 1967, parte de la misma hipótesis mencionada en el método de Morgenstern-Price. Una distinta constante de fuerza entre las rebanadas es asumida para satisfacer el equilibrio de fuerzas. De acuerdo al método de Spencer, la fuerza cortante entre rebanadas se escribe:

$$T = E \cdot \tan\phi \quad (10)$$

#### *Método de Sarma*

Desarrollado en el 1973, presenta diferencias a todos los métodos anteriormente mencionados porque considera que el coeficiente sísmico y el factor de seguridad son desconocidos. Se asume un factor de seguridad (FS) y luego se busca que coeficiente sísmico es capaz de producir este. En este método, la fuerza cortante entre rebanadas es una relación con la resistencia cortante (Diaz, 2012).

Resumen de métodos

Los métodos de rebanadas están basados en la hipótesis que puede existir o no una fuerza lateral  $E$  y una fuerza cortante  $T$ . La gran diferencia entre estos es la metodología utilizada para determinar estas fuerzas, si satisfacen el equilibrio de fuerza o momento y que tipo de superficies se pueden utilizar para encontrar el factor de seguridad (FS). En la Tabla 1 se puede apreciar un resumen de los métodos anteriormente mencionados.

Tabla 1. Resumen de los métodos de equilibrio limite. (Aryal, 2006)

Método	Superficie		Cumple equilibrio el de momento	Cumple el equilibrio de fuerzas	Hipótesis de contacto entre rebanadas
	Circular	No circular			
<i>Ordinario</i>	Si	No	Si	No	No toma en cuenta E y T
<i>Bishop simplificado</i>	Si	No	Si	Solamente cumple verticalmente para determinar (N')	Considera E pero no toma en cuenta T
<i>Bishop riguroso</i>	Si	No	Si	Si	Considera E y T
<i>Janbú Simplificado</i>	Si	Si	No	Si	Considera E pero no toma en cuenta T
<i>Janbú generalizado</i>	Si	Si	Si	Si	Considera E y T
<i>Lowe-Karafiath</i>	No	Si	No	Si	Considera la resultante de inclinación de fuerzas $\phi = 0.5(\alpha + \beta)$
<i>Corps of Engineers</i>	No	Si	No	Si	Considera la resultante de inclinación de fuerzas $\phi = 0.5(\alpha_1 + \beta_2)$
<i>Sarma</i>	Si	Si	Si	Si	Asume cortante entre rebanada; $T = ch + E \tan \phi$
<i>Spencer</i>	Si	No	Si	Si	Asume $T = E \tan \phi$
<i>Morgen.-Price</i>	Si	Si	Si	Si	Definido por $f(x)$ : $T = f(x) \cdot \lambda \cdot E$

### **3. Metodología de trabajo**

#### **3.1 Caracterización geográfica**

Para la ubicación geográfica de la zona de estudio fue necesario utilizar la herramienta *Visor*, proporcionada por el Instituto Cartográfico de Catalunya (ICC). También fue necesario la utilización de Google Earth para la vista aérea 3D del lugar.

Para realizar la descripción geográfica y a que limita este terreno se utilizó la enciclopedia de Catalunya.

#### **3.2 Caracterización geológica**

Para la caracterización geológica de la zona se obtuvieron los mapas del Instituto Geológico y Cartográfico de Catalunya (IGGC).

#### **3.3 Recopilación de información de trabajos previos**

##### **3.3.1 Clasificación del suelo**

La clasificación del suelo fue llevado a cabo por el laboratorio de la Universidad Politécnica de Catalunya. Esta fue obtenida del informe “Resultados basados en el trabajo final de master: *Caracterización, Auscultación Y Estudio De Un Deslizamiento En El Pre-Pirineo (Poblado De Cercs)*” (Cedeño Ramirez, 2014)

##### **3.3.2 Ensayos de resistencia**

Para la obtención de los parámetros de resistencia del suelo se utilizaron dos fuentes:

1. Los ensayos de laboratorio del trabajo final de master “Resultados basados en trabajo final de master: *Caracterización, Auscultación Y Estudio De Un Deslizamiento En El Pre-Pirineo (Poblado De Cercs)*” (Cedeño Ramirez, 2014)

2. Los ensayos llevados a cabo por un laboratorio externo, *GEOMAR en el trabajo final de grado de* (Pernia, 2015)

### 3.4 Recopilación de datos de la auscultación

Los datos obtenidos de la *precipitación* y el *potencial hídrico* del año 2015 fueron descargados de un servidor que enlaza la instrumentación de la zona de estudio con la Universidad Politécnica de Catalunya. También se obtuvieron datos con la misma metodología de *piezometría, contenido de agua y desplazamientos*.

La información proporcionada por los equipos son de forma desorganizada y utilizarlas para un análisis es complejo. Debido a esto, la organización y optimización para su fácil navegación fueron tratadas con la herramienta de Excel.

### 3.5 Respuesta del suelo de la precipitación anual

#### 3.5.1 Análisis Anual

Con la información recolectada del conjunto de instrumentaciones, se procedió a comparar gráficamente la respuesta que tuvo el suelo con respecto a la precipitación. Se hacen comparaciones individuales de las lecturas obtenidas por la instrumentación con respecto a la lluvia registrada, utilizando una escala anual.

#### 3.5.2 Análisis Puntual

De acuerdo con la información recolectada anualmente, se escogen los episodios más intensos del año y luego se analizan las lecturas obtenidas de la instrumentación por separado para tener una mejor interpretación de las respuestas en una escala diaria.

### 3.6 Análisis de Estabilidad

Se elaboró un modelo determinístico que relaciona el aumento del nivel piezométrico con la estabilidad del talud utilizando los parámetros resistentes del suelo registrados por *GEOMAR*. El análisis se divide en dos etapas:

- En la primera etapa se analiza la estabilidad de la ladera frente a un aumento en el nivel freático. Se van saturando los estratos que componen la ladera y se evalúa su nuevo factor de seguridad.
- En la segunda etapa se hace un análisis de sensibilidad paramétrica relacionando los parámetros resistentes obtenidos en el laboratorio y el cambio del factor de seguridad.

## 4. Descripción de la Zona de Estudio

### 4.1 Contexto Geográfico

Berguedá es la comarca más al norte de la provincia de Barcelona y está formada por 31 municipios, entre uno de ellos es Cercs, que está situada al norte de la ciudad de Berga, municipio y capital. Cercs se extiende una buena parte a la derecha del río Llobregat, que lo atraviesa de norte a sur paralelo al mismo. En la Figura 15.1 se puede apreciar la ubicación de la zona de estudio y en la Figura 15.2, una vista aérea en tres dimensiones.

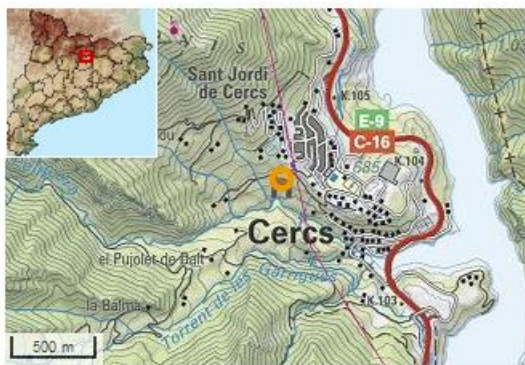


Figura 15.1 Mapa topográfico de Cercs. (ICGC)



15.2 Vista aérea de Cercs (Google Maps, 2015)

#### 4.1.1 Límites geográficos

Limita del SW al NW los Rasos de Peguera (rasos del Medio, Rasets, sierra de Corbera), separados por Castellar del Riu, cuello de Hortons, plan de Arriba, etc. Por el lado de Tramontana, Cercs hace un largo recorrido que se prolonga hasta tocar brevemente los límites de Vallcebre y Guardiola de Berguedà.

Para el E, limita con la Nou de Berguedà y más hacia el S, con Vilada. Finalmente por el SE, Cercs forma otro complemento (Pedret) del lado izquierdo del Llobregat, al S del Margançol que colinda con la Quar y Olvan. Esta extensión, limitada al S por la sierra de Montsent, es drenada por el torrente de Cal Bossoms, entre la sierra de Montsent al S y la sierra de Picancel al N. (Enciclopedia.cat)

## 4.2 Contexto Geológico

Una de las principales etapas para cualquier estudio de un deslizamiento de ladera es la recopilación de datos geológicos y condiciones en que actualmente se encuentra el subsuelo de la zona a estudiar para así plantear una solución geotécnica. Esta etapa deberá aportar una interpretación geológica lo suficiente clara que permita crear un modelo con valores fiables e inferir las respuestas del mismo. A continuación se muestra un mapa geológico (Figura 16) obtenida de las bases de datos del Instituto Geológico de Catalunya, con el fin de obtener una idea general del lugar de estudio.



Figura 16. Mapa geológico de Cercs (ICGC)

Como se puede ver en la imagen, *Kgp* es la unidad geológica a la que se refieren para la zona de estudio en Cercs. Esta se compone de rocas calcáreas o comúnmente conocida como rocas calizas, lutitas, y margo-calcáreas de la época mesozoica.

### 4.2.1 Clasificación del suelo

Para caracterizar el suelo de la región de estudio, se llevaron a cabo ensayos por el departamento geológico de la Universidad Politécnica de Catalunya, encabezado por Marcel Hürlimann. Se obtuvieron muestras de campo por medio de sondeos manuales y de una muestra bloque, que luego fueron analizados en el laboratorio. Estas fueron tratadas de forma cuidadosa para que no sufrieran el menor grado de alteración posible.



Para clasificar e identificar el tipo de suelo, se procede a la utilización de la Carta de Casagrande, basada en los Límites de Atterberg, el cual por medio de un ensayo se determina el valor del límite líquido (LL). Este corresponde al *contenido de agua gravimétrico* que tiene el suelo, que por debajo del mismo pasa a un estado líquido. En este estado la mezcla se encuentra al límite de convertirse un fluido viscoso. Se encontró también el límite plástico (LP) que corresponde al contenido de agua del suelo que por encima del pasa a un estado plástico. Los valores de los resultados se observan en la Figura 17.

LÍMITS D'ATTEMBERG							
	LÍMIT LÍQUID				LÍMIT PLÀSTIC		
nº de cops	18	28	36		1	1	0
Referència de la tara							
$a=(t+s+a)-(t+s)$	1.56	1.64	1.46	0	0.7	0.86	0
t+s+a	14.23	14.77	14.28		17.17	17.12	
t+s	12.67	13.13	12.82		16.47	16.26	
t	9.17	9.21	9.22		12.54	11.66	
$s=(t+s)-t$	3.5	3.92	3.6	0	3.93	4.6	0
$w=a/s*100$	44.57	41.84	40.56	1	17.81	18.7	0
	LL= 42.52				LP= 18.26		IP= 24.26

Figura 17. Límites de Atterberg. (Cedeño Ramirez, 2014)

Uno de los parámetros de correlación obtenidos a partir de la determinación de los límites anteriormente mencionados es el índice de plasticidad (IP), descrito como el rango de contenido de agua en el cual el suelo se comporta de forma plástica. El índice de plasticidad (observado en la Figura 18) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

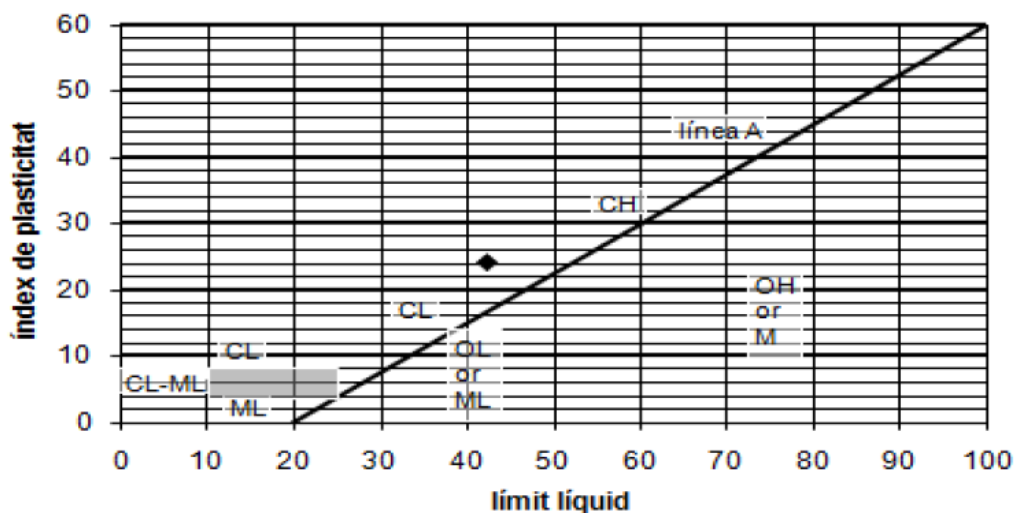


Figura 18. Relación entre el límite líquido y su índice plástico. (Cedeño Ramirez, 2014)

Las muestras, teniendo un IP de 24.26%, revelan que la ladera de Cercs está compuesta superficialmente por arcillas. Según las muestras, los primeros 5 cm se pueden encontrar *arcillas-limosas* de color marrón oscuro, correspondiendo al suelo edáfico. El segundo estrato se encuentra a una profundidad de 40 cm y se compone de arcillas ocre con cantos dispersos y pequeños de caliza, siendo estos transportados por coluvión y mostrando relación con el mapa geológico representado en la Figura 15. A partir de los 40 cm se encuentran argilitas ocre y grises con abundantes microfisuras horizontales y verticales tratándose de un sustrato deslizado. A partir de los 90 cm se encuentran las argilitas ocre y grises inalteradas. Este esquema puede ser apreciado en la Figura 19.



Figura 19. Estratos del suelo debajo del deslizamiento.

#### 4.2.2 Medición de la Resistencia a esfuerzo cortante

En un análisis de estabilidad es indispensable determinar con precisión la resistencia de los materiales a esfuerzo cortante y así saber en qué condición se encuentra la ladera. Existen ensayos en campo que determinan estos parámetros pero la forma más fiable y común es en laboratorio. Los métodos de laboratorio utilizados para los resultados fueron los siguientes:

##### *Corte directo:*

El ensayo de corte directo, llevado a cabo por *GEOMAR*, citado en el trabajo final de grado de (Pernia, 2015) y en el trabajo final de master de (Cedeño Ramirez, 2014) es el ensayo más común cuando se trata de encontrar la resistencia al corte para estudiar un deslizamiento. Fue originalmente desarrollado para la determinación del ángulo de corte ( $\phi'$ ) de arenas compactadas. Consiste en colocar la muestra de suelo en una caja, dividida en dos mitades y

aplicar una tensión horizontal en una de esas mitades, con el fin de desplazarla con respecto a la otra mitad a una velocidad de deformación constante. Una de las principales aplicaciones es para la determinación de su resistencia residual en arcillas sobre consolidadas. (Diaz, 2012)

Una vez comienza el ensayo, se registran los valores de la carga aplicada (kPa) así también como el desplazamiento horizontal (mm) y el asentamiento vertical (mm) que sufre la muestra.

*Corte anular:*

El ensayo de corte anular fue diseñado con el propósito de determinar la resistencia al corte residual en arcillas. La principal ventaja de este ensayo en comparación con el ensayo de corte directo consiste en un corte continuo con una superficie constante durante todo el ensayo. Este método nos permite recrear en el laboratorio exactamente las condiciones de campo, dando valores de resistencia al corte residual muy exactos. (ADATEC)

**4.2.3 Resultados de los ensayos de laboratorio**

*1. Resultados basados en el trabajo final de master Caracterización, Auscultación Y Estudio De Un Deslizamiento En El Pre-Pirineo (Poblado De Cercs) (Cedeño Ramirez, 2014)*

*a) Ensayo de corte anular*

*Tabla 2. Ángulo de resistencia pico. (Cedeño Ramirez, 2014)*

Tensión Vertical (KPa)	Tensión de Corte (KPa)	
	Envolvente de rotura residual	Envolvente de rotura pico
150	40.62	42.6
100	29.61	30.69
50	16.78	21
<b>Angulo resistencia pico</b>	<b>15.64</b>	<b>15.74</b>

b) Ensayo de corte directo

Tabla 3. Ángulo de rozamiento interno. (Cedeño Ramirez, 2014)

Tensión Normal (KPa)	Tensión de Corte (KPa)	
	Envolvente de rotura pico	Envolvente de rotura crítica
0	0	0
100	14.53	16.76
150	15.45	25.78
<b>Angulo rozamiento interno</b>	<b>11.3</b>	<b>9.64</b>

2. Para la determinación de estos parámetros en la zona de estudio se obtuvieron cuatro muestras del suelo y la consultora GEOMAR se encargó del análisis.

Tabla 4. Resumen de ensayos para parámetros del suelo. (Pernia, 2015)

Numero de muestra	m-1	m-2	m-3	m-4
Material	Coluvión	Coluvión	Argilitas	C-3
Profundidad (m)	-	-	-	0.6
Longitud (m)	-	-	-	0.35
Tipo de muestra	C (MR)	A (MI)	A (MI)	C (MR)

Numero de muestra	m-1	m-2	m-3	m-4	
Humedad Natural (%)		19.79			
Densidad (g/cm3)	Aparente	-	1.71	2.03	2.03
	Seca	-	1.43	1.83	1.72
Densidad Part. Solidas (g/cm3)	-	-	-	2.718	
Granulometría por tamizado	% pasa por #5	90.6	-	-	97.4
	% pasa por #2	82.6	-	-	96.6
	% pasa por #0.4	76.6	-	-	95.1
	% pasa por #0.08	70.2	-	-	92.7
Límites de Atterberg	L. Liquido	40.1	-	-	49.8
	L. Plástico	22.4	-	-	20.2
	Índice Plástico	17.7	-	-	29.6
Clasificación U.S.C.S	CL	-	-	CL	
Granulometría por sedimentación	% limos	-	-	-	47.55
	% argilitas	-	-	-	42.55
Corte Directo	Cohesión (kg/cm3)	-	0.03	0.19	-
	Angulo de fricción interno (°)	-	26.0	29.5	-
Corte Directo residual	Cohesión (kg/cm3)				0
	Angulo de fricción interno (°)				14.4

### 4.3 Contexto Geomorfológico

El relieve juega un papel importante cuando se trata de un movimiento de masa. La gravedad y una pendiente pronunciada se convierten en un factor condicionante del mismo. Es por esto que zonas montañosas con cambios de altura significativos son más propensas a fallar por deslizamientos. A continuación se utiliza la herramienta proporcionada por el visor del Instituto Cartográfico de Catalunya (ICC) que define un perfil aproximado en la zona trazada para la Figura 20.



Figura 20. Vista en planta para los perfiles escogidos. (ICGC)

Donde los cortes son:

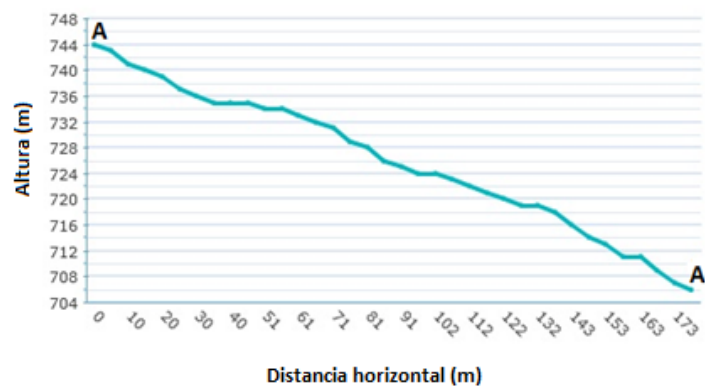


Figura 21. Sección A-A' (ICGC)

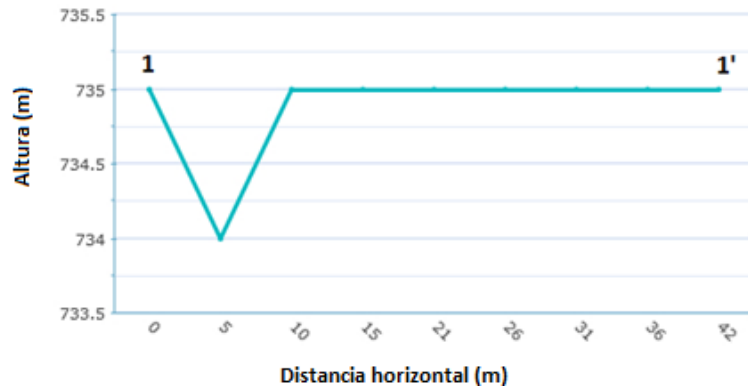


Figura 22. Sección 1-1' (ICGC)

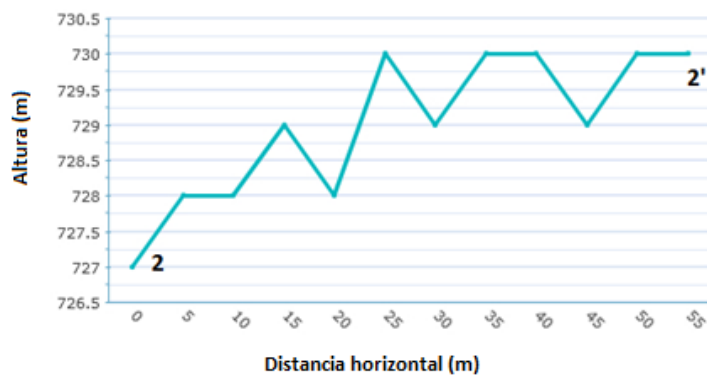


Figura 23. Sección 2-2' (ICGC)

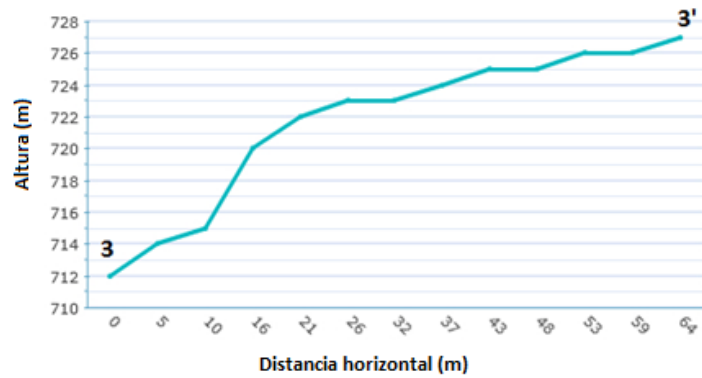


Figura 24. Sección 3-3' (ICGC)

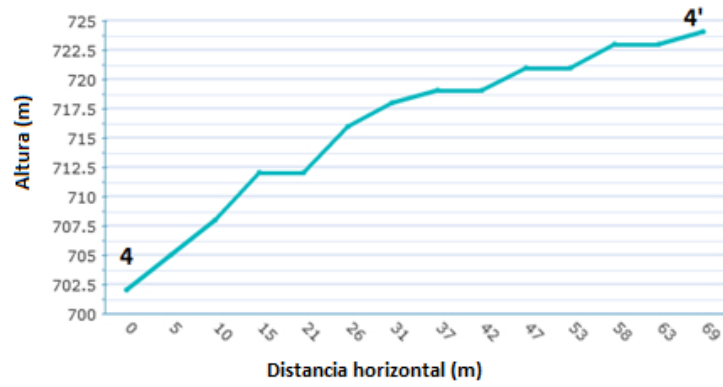


Figura 25. Sección 4-4' (ICGC)

## 5. Instrumentación

El agua es uno de los factores que con mayor frecuencia se encuentra relacionado con fallas de laderas. Estos ocurren comúnmente posterior o durante periodos de precipitaciones intensas, como se ha mencionado anteriormente. El control hidrogeológico de una ladera es una de las prácticas más efectivas y habituales para anticipar un deslizamiento. Resumiendo los conceptos básicos expuestos en el Capítulo 2, la infiltración de agua en el terreno produce un aumento en la presión de poros y a la vez disminuye su resistencia al corte, permitiendo que una superficie se deslice ante otra.

Para analizar los factores que podrían producir una falla, se instalaron sistemas de auscultación, comúnmente conocido como *sistemas de monitoreo* y así recolectar las lecturas obtenidas por los mismos para el año 2015. Estas instrumentaciones se componen de dos estaciones; una siendo la SLOPE que sus sensores se encuentran en la zona del deslizamiento (coluvión) y la otra, METEO, localizada pendiente abajo de la ladera. La ubicación de estas estaciones se puede apreciar en la Figura 26. En la sección a continuación se describe la instrumentación utilizada en cada estación.



Figura 26. Ubicación sistemas de monitoreo. (ICGC)



## 5.1 Estación METEO

Esta estación se compone de instrumentos que registran las condiciones climáticas que afectan la región. En la Figura 27 se puede ver el conjunto de instrumentación necesaria para cualquier análisis meteorológico.



Figura 27. Estación Meteo.

Para analizar la cantidad de agua precipitada en la ladera se utilizó un pluviómetro (*Decagon ECRN-100*): Se compone de dos cucharas de inflexión internas midiendo 0.2mm de lluvia por cuchara desplazada. Su fácil funcionamiento hizo posible registrar los datos e ingresarlos a una base de datos. De ahí se procede a organizar la precipitación de acuerdo con las fechas establecidas.

## 5.2 Estación SLOPE

Esta estación se compone principalmente de sensores que registran parámetros que afectan directamente a la superficie del deslizamiento.

a) Sensor de contenido de agua en el suelo (*Decagon 10HS*): Sensor que determina el contenido de agua volumétrica (VWC). Se colocaron dos sensores de estos a profundidades de 23cm y 36cm por debajo de la superficie.



Figura 28a. La figura de la izquierda es data logger.



Figura 28b. El sensor del contenido de agua. (Decagon)

Según Decagon, en la documentación relacionada con este instrumento, existen distintos métodos para hacer estimaciones del contenido de agua del suelo, pero cada uno de ellos se aleja de la realidad. Sin embargo, los métodos dieléctricos se tratan de un dispositivo que forma un campo electromagnético en el suelo. El suelo está conformado por aire, agua y minerales capaces de almacenar cargas eléctricas. Debido a que en un suelo el agua y aire cambian con frecuencia, se puede hacer mediciones en el cambio que tengan los mismos. Con este cambio se estima la cantidad de agua que tenga el suelo. El método que este utiliza es por dominio de frecuencia y registra los valores en voltajes. Para su calibración se utilizó la siguiente ecuación, donde  $V$  es el voltaje registrado por el instrumento:

$$\varepsilon_a = 2.589 \times 10^{-10} * mV^4 * -5.01 \times 10^{-7} * mV^3 + 3.523 \times 10^{-4} * mV^2 - 9.135 \times 10^{-2} * mV + 7.457 \quad (11)$$

b) Sensor de succión y temperatura del suelo (*Decagon MPS-2*): Un sensor dieléctrico que mide el potencial de agua y a la vez registra sus valores conjunto con la temperatura del suelo. Al igual que los sensores que registran el contenido de agua, se colocaron dos sensores de estos a profundidades de 23cm y 36cm por debajo de la superficie, ilustrado en la Figura 29.



Figura 29. Sensor MPS-2 (Decagon)

Debido a su fácil funcionamiento, este no requiere de un uso especializado. Se inserta en el suelo, conectada a su caja de registro (ver figura 28a) y automáticamente almacena los valores de potencial de agua para rangos de minutos establecidos.

c) Piezómetro (*Geosense VWP-3200*): Se trata de un piezómetro de cuerda vibrante que convierte las presiones de un fluido a una señal de frecuencia. Son de gran utilidad debido a que poseen la capacidad de transmitir señales de larga distancia sin degradación.



Figura 30. Piezómetro Geosense VWP-3200 (Geosense)

d) Sensor de desplazamiento (*ASM WS12-3000*): Este instrumento mide el desplazamiento que tiene el terreno anclando un punto a una posición fija y otra al coluvió. Se puede ver la imagen del mismo en la Figura 31.



Figura 31. Extensómetro ASM WS12-3000 (GmbH, 2016)

### 5.2.1 Instalación de sensores

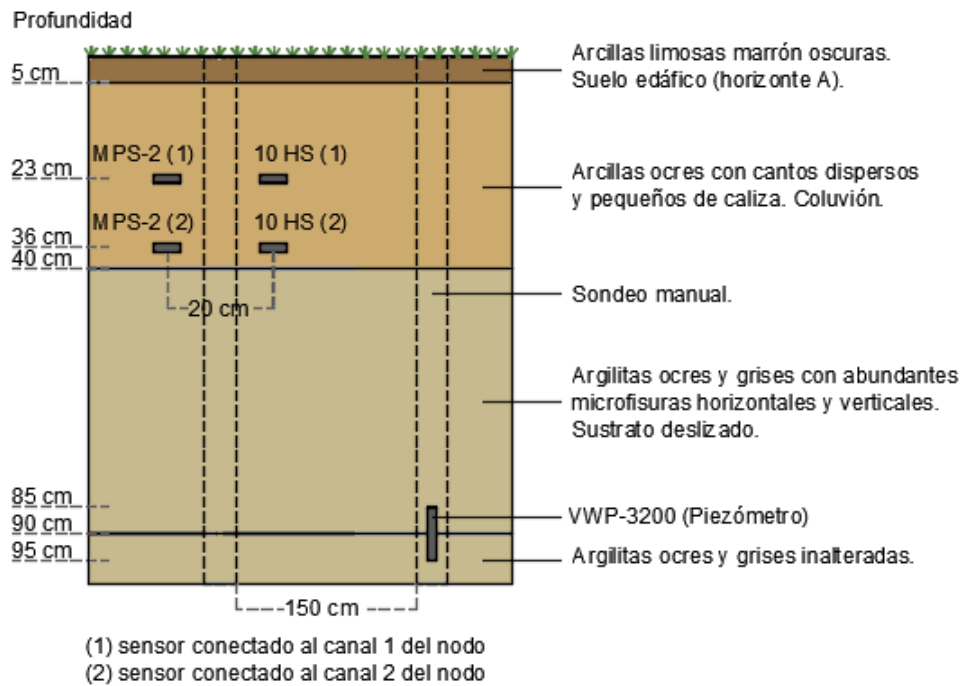


Figura 32. Ubicación de los sensores que corresponden a la estación SLOPE.

Los sensores que miden la succión del suelo, MPS-2 y los que miden el contenido de agua volumétrica, 10 HS, están colocados a dos profundidades dentro del coluvión, a 23 cm y a 36 cm de profundidad con respecto a la superficie. El piezómetro, VWP-3200 se colocó a 85 cm por debajo de la superficie.

Con el fin de facilitar las lecturas de los sensores, se le asignan los siguientes nombres a cada sensor:

Tabla 5. Nomenclatura de los sensores.

Profundidad con respecto a la superficie	Potencial Hídrico	Contenido de agua
23 cm	S.1 WP -23cm	S.1 VWC -23cm
36 cm	S.2 WP -36cm	S.2 VWC -36cm

## 6. Resultados y discusión

### 6.1 Análisis hidrogeológico del año 2015

La confección de un análisis hidrogeológico es muy importante para intuir el comportamiento de una ladera ante posibles inestabilidades. Este análisis cuenta con la respuesta ante la infiltración de agua en el coluvión y observar las fluctuaciones en el nivel freático. Además, se identifican los cambios en las presiones de poro, variaciones en el contenido de agua y posibles desplazamientos producidos por la lluvia.

#### 6.1.1 Precipitación

Estudios como (Polemio & Petrucci, 2000) y (Larsen & Simon, 1993) sugieren que hay una relación entre la *duración* y la *intensidad* de la lluvia cuando ocurre un deslizamiento. Sus hipótesis se crearon a partir de comparaciones gráficas entre la intensidad de lluvias horarias y las diarias. Sus resultados concluyeron que episodios de precipitaciones con alta intensidad y corta duración son igual de propensos a causar un deslizamiento que aquellos de poca intensidad y larga duración. Sin embargo, para que ocurra la reactivación de un deslizamiento, un proceso de carga y descarga en la presión de poros deben ser provocados por la lluvia a lo largo de los años (Zang et al, 2006). En la Figura 33 se observa la precipitación diaria correspondiente al año 2015.

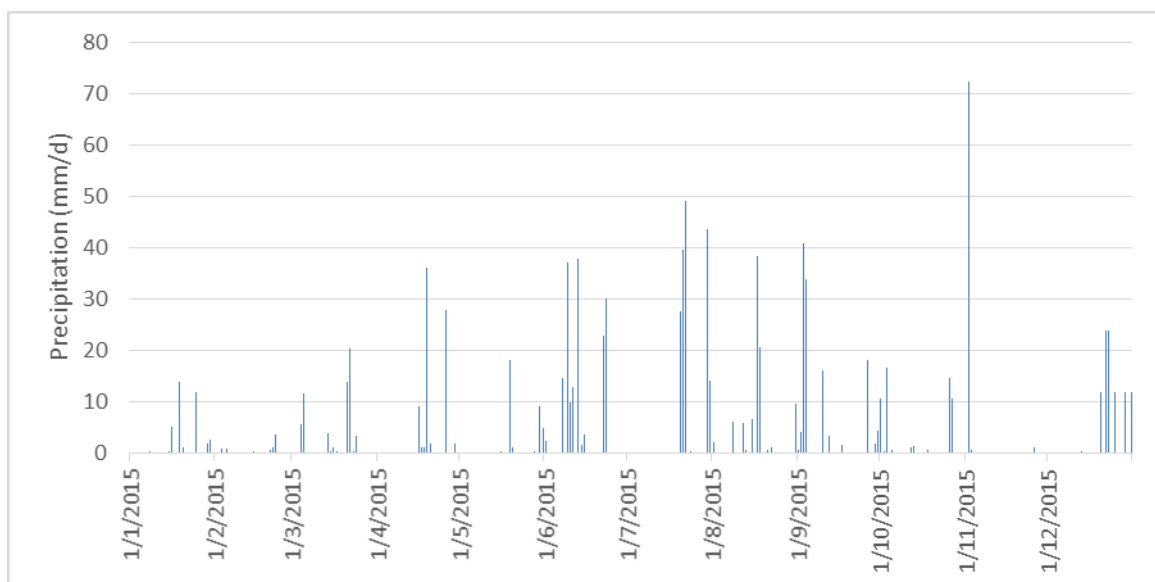


Figura 33. Precipitación diaria correspondiente al 2015.

Se puede apreciar que se trata de un año mayormente seco, salvo algunos episodios de lluvias intensas. Estas pueden saturar el suelo de forma rápida y generar presiones de poros lo suficientemente fuertes como para producir un deslizamiento. Contrario a lo anterior, hay casos como muestra el estudio (Caine, 1980) en el cual lluvias de larga duración y de menor intensidad horaria desencadenan grandes deslizamientos.

La ladera de Cercs, al estar compuesta de una matriz arcillosa, tiene una permeabilidad relativamente baja, con alta porosidad. El suelo arcilloso tiende a fallar con lluvias de poca intensidad y larga duración, contrario a coluviones de material granular. En un episodio de larga duración, debido a que Cercs posee una permeabilidad baja y está altamente fracturado, el tiempo juega un papel importante en la infiltración de lluvia. Es por esta razón que el análisis a continuación no solamente se centrará en episodios de máxima precipitación horaria, sino también en episodios donde se observa mayor acumulación de lluvias diarias.

### 6.1.2 Infiltración

Una vez se origina una lluvia, el agua precipitada tratará de infiltrarse al suelo, forzando al agua que ya existía dentro de los poros a desplazarse hacia debajo por medio de presión. El tiempo de respuesta de cada suelo es diferente. Las respuestas lentas ocurren en suelos de permeabilidades bajas y están relacionados deslizamientos por elevación del nivel freático, mientras que las respuestas rápidas están relacionadas a suelos con alta permeabilidad y fallan por eliminación de la succión al producirse la saturación por acción del frente húmedo de infiltración. (Diaz, 2012)

En un estudio pasado, Cedeño Ramírez (2014) realizó un ensayo de infiltración de forma directa en el coluvión utilizando un *infiltrómetro*. Este ensayo consiste en colocar un tubo en el suelo y agregarle la cantidad de agua deseada para analizar el tiempo que se tarda en infiltrarse. Los resultados del mismo pueden observarse en la Tabla 6.

Tabla 6. Ensayo de infiltración (Cedeño Ramirez, 2014)

Ensayo	Radio (cm/s)	$\alpha$	n/h <sub>o</sub>	Succión (cm/s)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga hidráulica	K (permeabilidad)
1	2.25	0.005	1.09	-2	6.359	2.044 x 10 <sup>-4</sup>	3.21 x 10 <sup>-5</sup>
2	2.25	0.005	1.09	-2	6.359	2.606 x 10 <sup>-4</sup>	4.10 x 10 <sup>-5</sup>

Los valores de permeabilidad registrados en este ensayo presentan velocidades de infiltración relativamente lentas. Estos corresponden a valores de permeabilidad establecidos por (González de Vallejo, et al., 2002), el cual establece que las arcilla – limosa oscila entre los 10<sup>5</sup> – 10<sup>-8</sup> cm/s.

Según Díaz (2012), la cabeza de un talud es la zona de mayor permeabilidad. El agua fluye a través de las zonas que presentan mayor permeabilidad, generándose un diferencial de presiones de poro concentradas. No obstante, se tienden a producir grietas que facilitan la infiltración de agua, abriendo la posibilidad de formación de una superficie de falla. En la cabecera del coluvión (Figura 34b) se puede apreciar la formación de una laguna, como se muestra en la Figura 34a. Esta laguna permite tener una idea general del comportamiento del suelo ante la infiltración en zonas llanas.



Figura 34a. Formación de lago en la cabecera del coluvión.

Figura 34b. Ubicación lago cabecera.

Según Díaz (2012), estos suelos de permeabilidad baja pueden responder de forma lenta debido a que la infiltración ocurre en zonas alejadas del deslizamiento. El agua del lago puede infiltrarse en el terreno, en el caso que las fracturas conduzcan el agua por diferencia de potenciales y producir una repulsión entre las partículas que se encuentran debajo del talud. En las secciones a continuación se analizará las respuestas registradas por la instrumentación y la interpretación de su respuesta ante la precipitación.

### 6.1.2.1 Potencial hídrico (Succión)

Para comprender la capacidad que tiene el suelo de absorber el agua y redistribuirla por capilaridad, se procede a observar su respuesta con relación a la succión. Como se explicó en los conceptos básicos, en suelos no saturados, el agua es absorbida por una fuerza (succión) y para extraerla se necesitaría cierto nivel de energía.

En la Figura 32 se puede ver a las profundidades el cual se colocaron los sensores de succión. Los valores registrados por estos sensores con relación a los cambios en la precipitación pueden observarse en la Figura 35.

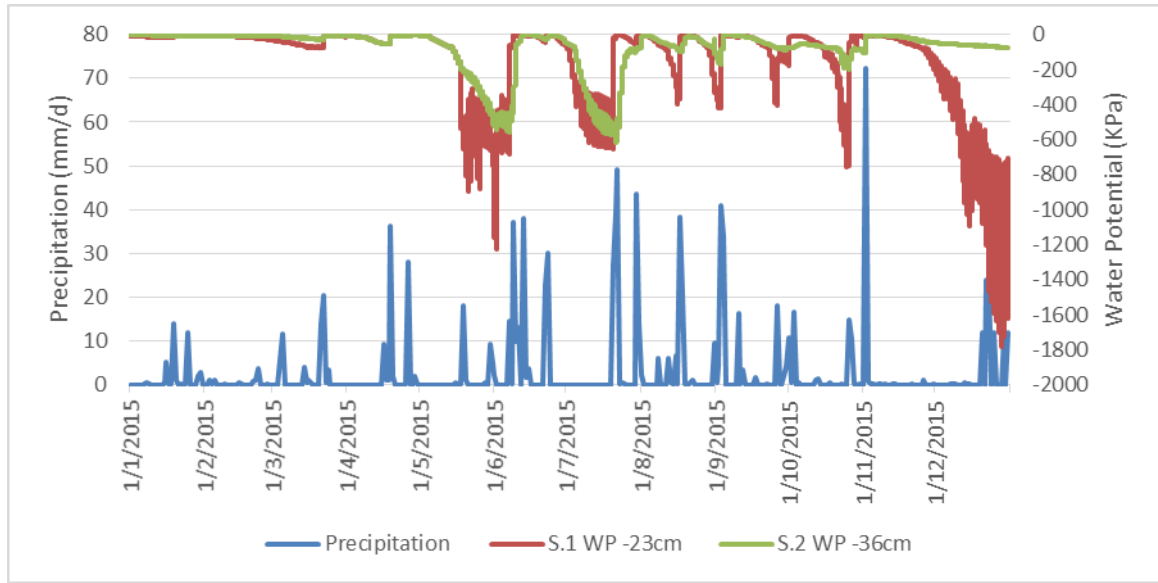


Figura 35. Relación precipitación diaria – potencial hídrico correspondiente al año 2015.

En la figura anterior, demostrando el principio de fuerzas capilares, se puede inferir que el agua precipitada sobre el suelo seco provoca un aumento en la presión de poros con cierta rapidez. Dicha presión, que se encontraba con valores negativos, comienza a disminuir (aumentar positivamente) a medida que el agua comienza a infiltrarse en el suelo. Se observa como el suelo responde inmediatamente surge un episodio lluvioso y al momento de concluir el mismo. Este cambio brusco en las presiones de poro se puede observar mayormente relacionado a lluvias intensas de larga duración.

Los sensores de succión también están registrando los valores de temperatura del suelo para el año 2015, como se muestran en la Figura 36.

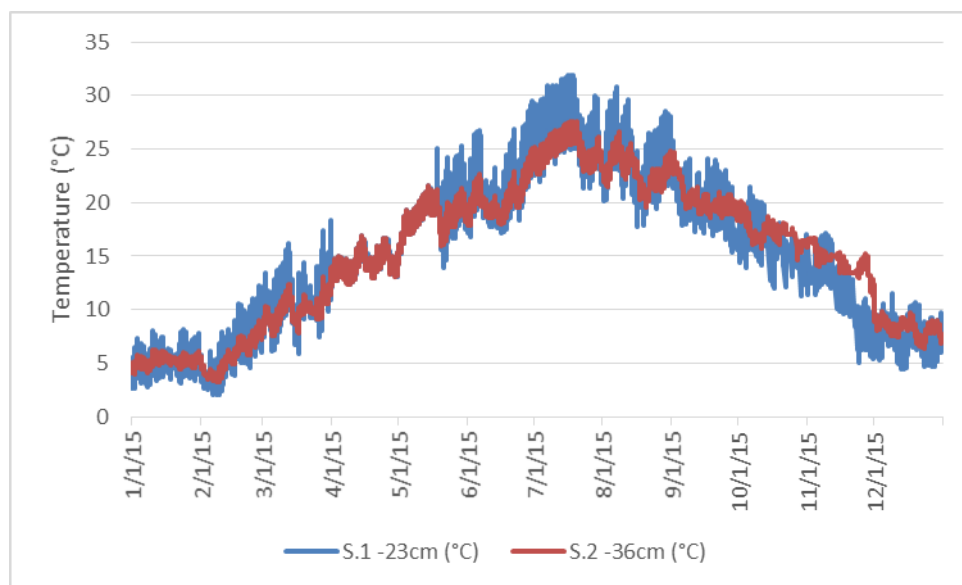


Figure 36. Temperatura diaria correspondiente al año 2015.



Según la ecuación de Kelvin, a medida que la temperatura decae, la succión se vuelve menor (Ecuación 12). Esto se basa en que al aumentar la temperatura, el potencial hídrico aumenta por el incremento en la energía cinética de las moléculas de aguas. (Alvarado, 2011)

$$\Psi = \frac{RT}{M_w} \ln H_r \quad (12)$$

Siendo:

Succión,  $\Psi$

La constante de gas universal,  $R$

La temperatura del suelo,  $T$

Masa molecular del agua,  $M_w$

Humedad relativa,  $H_r$

Se observa que el potencial de agua es mayor a medida que se aproxima a la superficie. El sensor S.1 WP -23cm, que se encuentra más cercano a la superficie, experimenta mayor succión que el S.2 WP -36cm, que se encuentra más alejado. Aunque ambos sensores responden de forma similar con precipitaciones de alta intensidad, se puede observar como el suelo que envuelve ambos sensores podría presentar variaciones en sus características geotécnicas.

En conclusión, la respuesta rápida por ambos sensores, a pesar de su distancia de separación uno del otro, indican el alto nivel de fracturación que presenta el suelo del coluvión. El hecho que los sensores respondan poco tiempo después de ocurrir un episodio lluvioso indica la posibilidad que un frente húmedo pueda avanzar y provocar la falla del suelo por eliminación de tensiones negativas, aunque mayormente se observa en suelos permeables.

### 6.1.2.3 Contenido de agua

Para que exista un aumento en la presión de poros, el suelo debe tener suficiente agua para llenar los mismos. En la Figura 37 se observa las fluctuaciones del porcentaje de agua ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) con respecto a la precipitación.

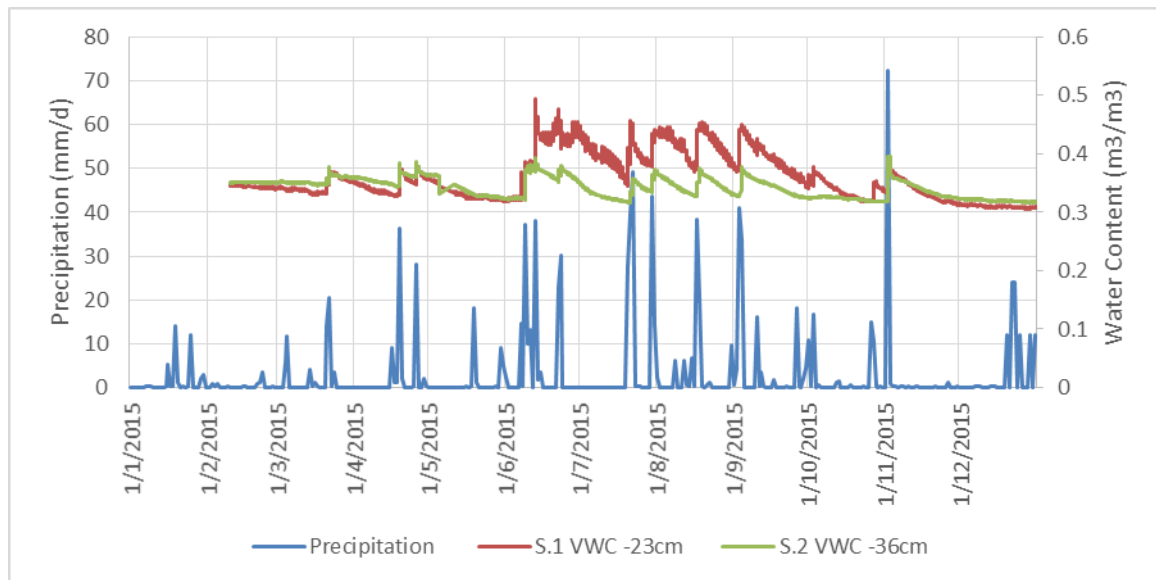


Figura 37. Relación precipitación diaria – contenido de agua volumétrica correspondiente al año 2015.

Se observa en la respuesta del suelo, comprendida entre los meses de febrero y mayo, una retención de agua diferente a otros meses. Al igual que los valores registrados por los sensores de succión, los sensores de contenido de agua son influenciados por la temperatura. Para los meses anteriormente mencionados, puede apreciarse que el contenido de agua del suelo es muy bajo comparado a otros. Si se utiliza nuevamente la ecuación de Kelvin (Ecuación 12), se observa que a medida que la temperatura baja, el contenido de agua del suelo se vuelve menor.

A partir de junio, que la temperatura comienza a aumentar, se nota un aumento en el contenido de agua. El S.1 VWC -23cm, que se encuentra cercano a la superficie, responde con mayor rapidez en episodios que presentan alta intensidad de lluvia y retiene mayor cantidad de agua. Sin embargo, el S.2 VWC -36cm, que retiene menos cantidad de agua, responde de forma similar cuando la intensidad de la lluvia es alta.

En la Figura 38 se representa la relación entre succión y contenido de agua volumétrica. El contenido de agua al momento de secado exhibe valores más altos que al momento de humectación del suelo, conociéndose como el principio de histéresis.

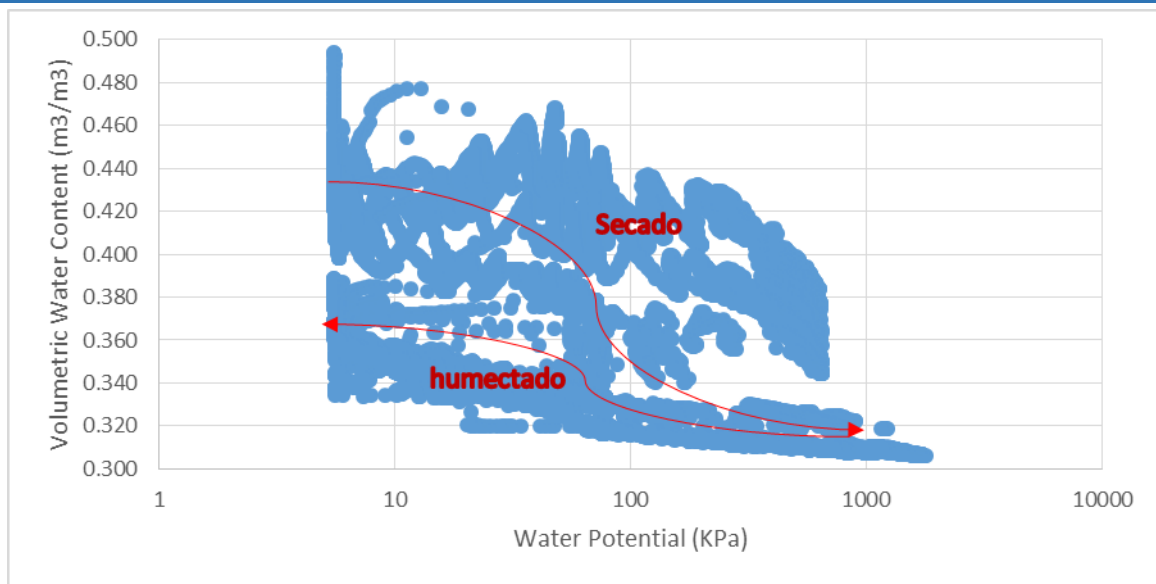


Figura 38. Curva de retención del suelo para los sensores de profundidad -23cm.

El mismo comportamiento se observa para el sensor que se encuentra a mayor profundidad (Figura 39). Si se hace una comparación entre el sensor más cercano a la superficie y el más alejado, el contenido de agua del primero es mayor. El suelo llega a una saturación con valores promedios de 0.42 – 0.44 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, mientras que el sensor con mayor profundidad registra valores de 0.36-0.37 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, como se observa en la Figura 39.

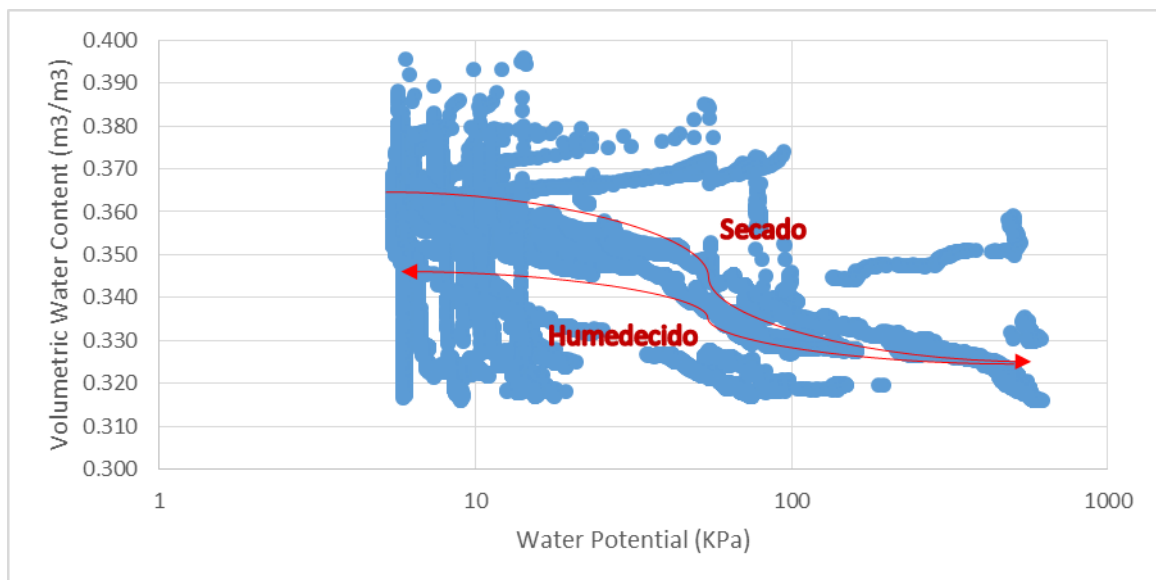


Figura 39. Curva de retención del suelo para los sensores de profundidad -36cm.

### 6.1.2.2 Piezometría

Para analizar las oscilaciones en las presiones de poros que indiquen un posible ascenso en nivel freático, se utilizó un piezómetro. A diferencia de las respuestas obtenidas por los sensores de succión, aquellas presiones de poro mayores que la atmosférica son positivas y se encuentran por debajo del nivel freático, mientras las presiones negativas, menores que la atmosférica, se encuentran por encima del nivel freático. En la Figura 40 se muestra las variaciones en las presiones de poro con respecto a la precipitación anual.

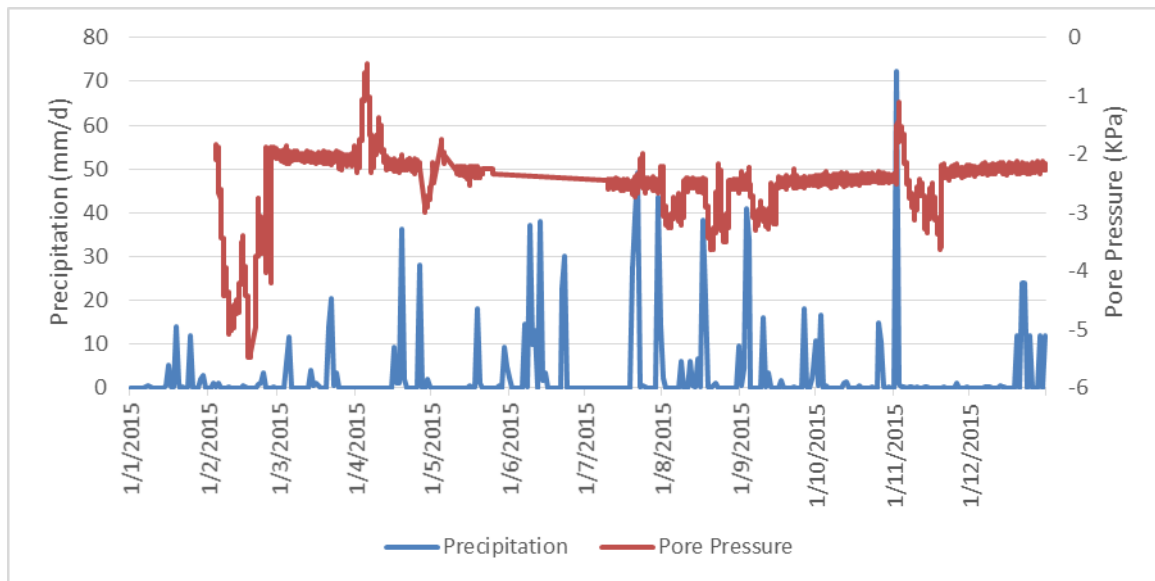


Figura 40. Relación precipitación diaria - fluctuaciones del piezómetro correspondiente al año 2015.

En la gráfica se puede apreciar, que en la zona donde se colocó el piezómetro, no experimentó ningún aumento en las presiones de poro que pueda poner en riesgo la ladera. De acuerdo con las especificaciones del piezómetro de cuerda vibrante, este es capaz de medir succión, además de presiones positivas. La presión de poros, para una profundidad de 85 cm por debajo de la superficie, oscilan entre -5.5 KPa y -0.46 KPa. Esto significa que a lo largo del año, no se presentó una presión positiva y el nivel freático no se vio afectado.

Queda claro que las argilitas presentan permeabilidades totalmente independientes a las del coluvión. El tiempo de respuesta para el material por encima de las argilitas alteradas es muy rápido, contrario a la respuesta del piezómetro. El hecho que posiblemente exista una permeabilidad alta en la zona superior del deslizamiento no implica una infiltración rápida capaz de elevar el nivel freático.

### 6.1.3 Desplazamiento

Para medir el desplazamiento que puede obtener el terreno con respecto a la precipitación registrada, se utilizó un extensómetro. Este mide el movimiento que presenta el terreno con respecto a dos puntos establecidos. Las lecturas registradas durante el periodo expuesto se ilustran en la Figura 41.

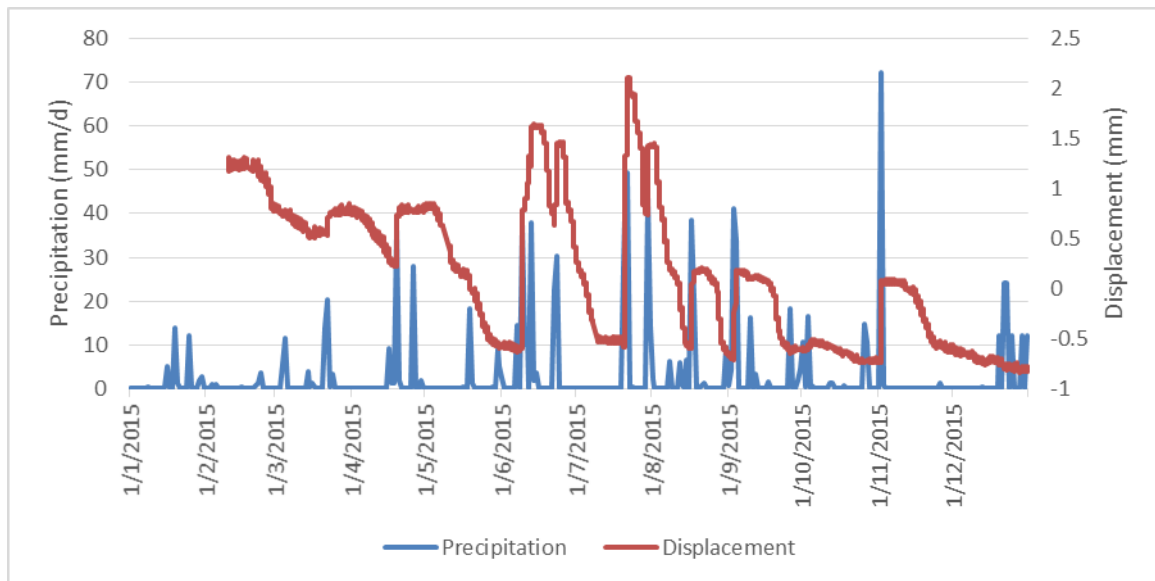


Figura 41. Relación precipitación diaria – desplazamientos de la ladera correspondiente al año 2015.

En la figura anterior se observa que no hubo desplazamientos. A pesar de registrar oscilaciones muy pequeñas, su lectura indica que no hubo indicios de un posible movimiento de ladera. El comportamiento del suelo se relaciona con las lecturas tomadas de las otras instrumentaciones. Las oscilaciones registradas por el piezómetro confirman que el nivel freático no aumenta a lo largo del año.

## 6.2 Análisis hidrogeológico para los episodios con mayor precipitación

### 6.2.1 Episodio de larga duración

El día registrado con mayor acumulación de lluvia fue el 2 de noviembre del 2015 donde hubo una precipitación de 72.26 mm/d, con un máximo horario de 21.6 mm/h, como se muestra en la Figura 42.

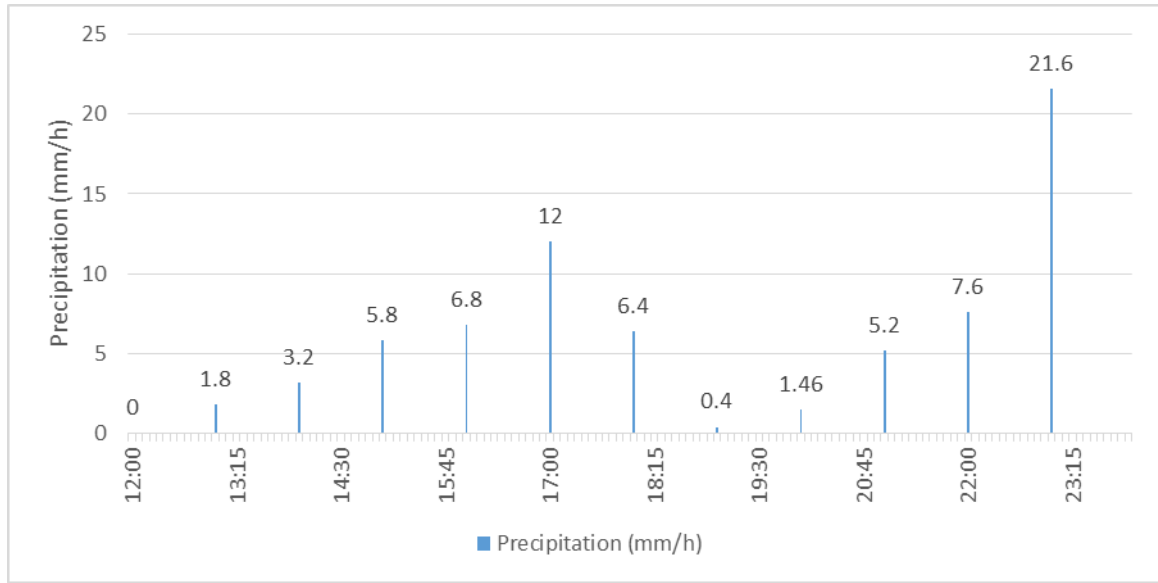


Figura 42. Precipitación horaria para el día 2 de noviembre de 2015.

### 6.2.1.1 Potencial hídrico (succión)

De acuerdo con la precipitación, es de esperarse una respuesta progresiva a partir de las 12:00h por los sensores de succión. En la Figura 43 se observa la variación de las fuerzas capilares con relación a la infiltración del agua de lluvia. Cabe destacar que la precipitación del día anterior, 1 de noviembre del 2015 fue de 0 mm.

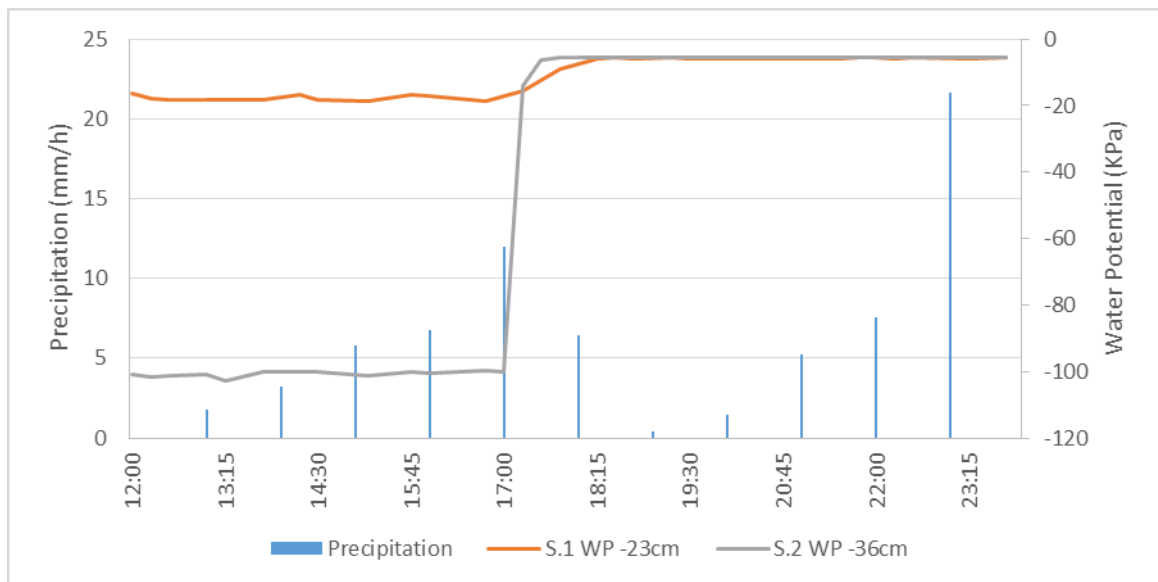


Figura 43. Relación precipitación horaria – potencial hídrico para el 2 de noviembre de 2015.

Como se observa en la figura anterior, el sensor S.1 WP -23cm experimenta menor succión que el que se encuentra más alejado, S.2 WP -36cm. A las 17:00h se produce una lluvia intensa

correspondiendo a 12 mm/h y es con este episodio que el sensor S.2 WP -36 se ve mayormente afectado, indicando una respuesta brusca en relación a la precipitación horaria. Debido a que el suelo es arcilloso y se tiene una infiltración con cierta rapidez, una posible justificación ante el comportamiento es el alto contenido de fisuras del mismo, como se observó en los resultados anuales.

La succión se ve afectada para ambos sensores únicamente cuando la precipitación es lo suficiente intensa para permitir una infiltración a las zonas más profundas. Este reacciona desplazando el agua hacia abajo, produciendo un frente húmedo. A medida que el terreno va absorbiendo el agua de la lluvia, su tiempo de respuesta es lo suficiente rápido para tener un incremento positivo de 98.9 kPa en menos de una hora.

### 6.2.1.2 Contenido de agua

Las respuestas obtenidas por el sensor de succión representan que hubo un cambio en las presiones de poro pocas horas después de comenzar las lluvias. En la Figura 44 se puede apreciar esta diferencia con relación al contenido de agua.

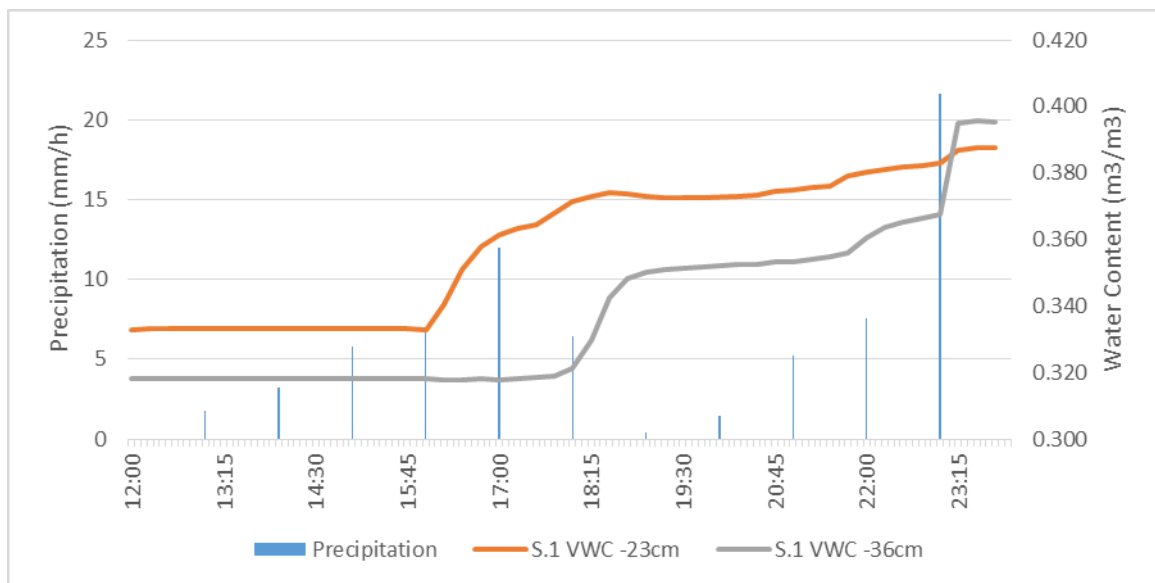


Figura 44. Relación precipitación horaria – contenido de agua para el 2 de noviembre de 2015.

El sensor S.1 VWC -23cm responde inmediatamente al momento de presentarse un episodio intenso de corta duración, sin embargo, el sensor S.2 VWC -36cm responde horas después de producirse la lluvia. Esto se puede presenciar en las dos precipitaciones máximas horarias, una correspondiendo a las 17:00h y la otra a las 23:00h. En la figura anterior se puede apreciar como el sensor S.2 VWC -36cm, al producirse una lluvia de mucha intensidad, llega a retener mayor cantidad del agua que el otro sensor.

### 6.2.1.3 Piezometría

La respuesta obtenida por los cambios en el la presión de poros obtenidos por el piezómetro se puede apreciar en la Figura 45.

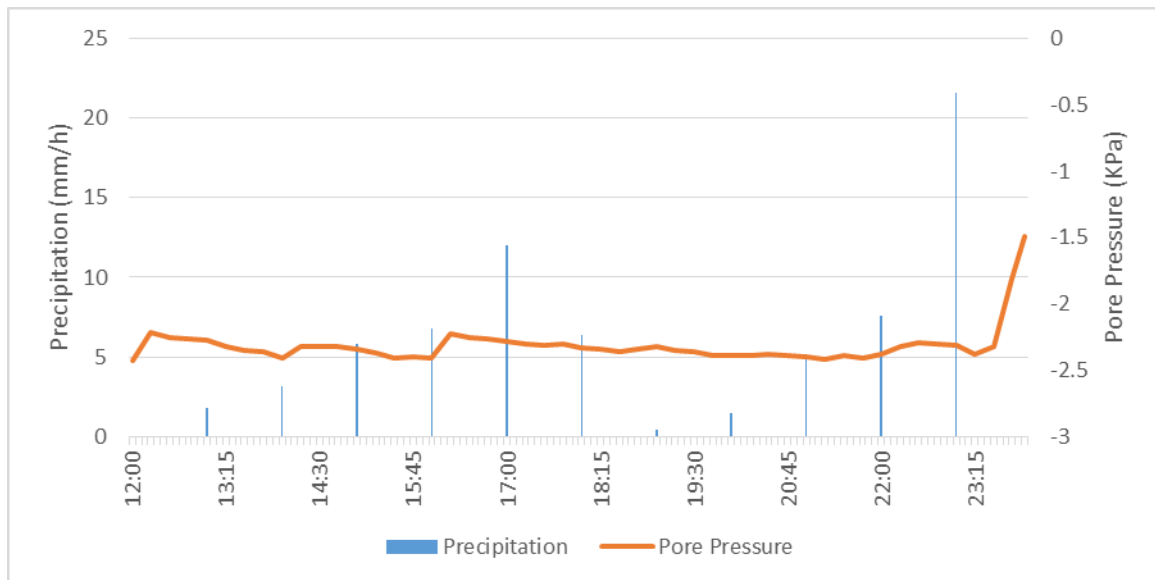


Figura 45. Relación precipitación horaria – variación piezométrica para el 2 de noviembre de 2015.

La respuesta por parte del piezómetro es casi nula. Se asume que el nivel freático no es afectado debido a que el suelo presenta medidas de succión durante todo el episodio lluvioso. Luego de la precipitación máxima horaria, la presión de poro aumenta lo suficiente para notar un cambio pero no lo suficiente para provocar una presión positiva.



### 6.2.1.4 Desplazamiento

Las lecturas registradas ante un posible desplazamiento son ilustradas en la Figura 46.

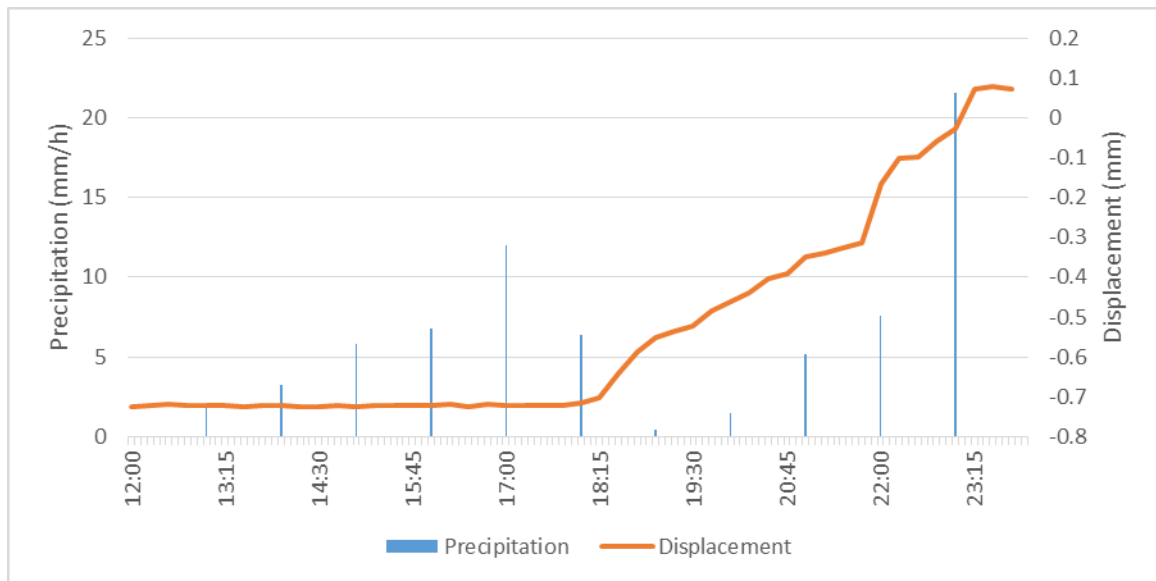


Figura 46. Relación precipitación horaria – desplazamientos de la ladera para el 2 de noviembre de 2015.

El suelo no presenta desplazamientos significativos. Su comportamiento se debe a un conjunto de factores que provoca un desplazamiento milimétrico en el sensor y se concluye que el suelo no se desplaza. Lo que se muestra representativo es que igual a las respuestas de las otras instrumentaciones, el cambio se aprecia a partir de las 17:00h que llueve con mayor intensidad que las otras horas.

### 6.2.2 Episodio de corta duración

El día registrado con mayor intensidad de lluvia horaria fue el 22 de julio del 2015, donde se observó una precipitación de 44.2 mm/h, ilustrado en la Figura 47. El día anterior a este se registró una precipitación diaria de 27.6 mm/d, consiguiendo que pueda permanecer húmedo.

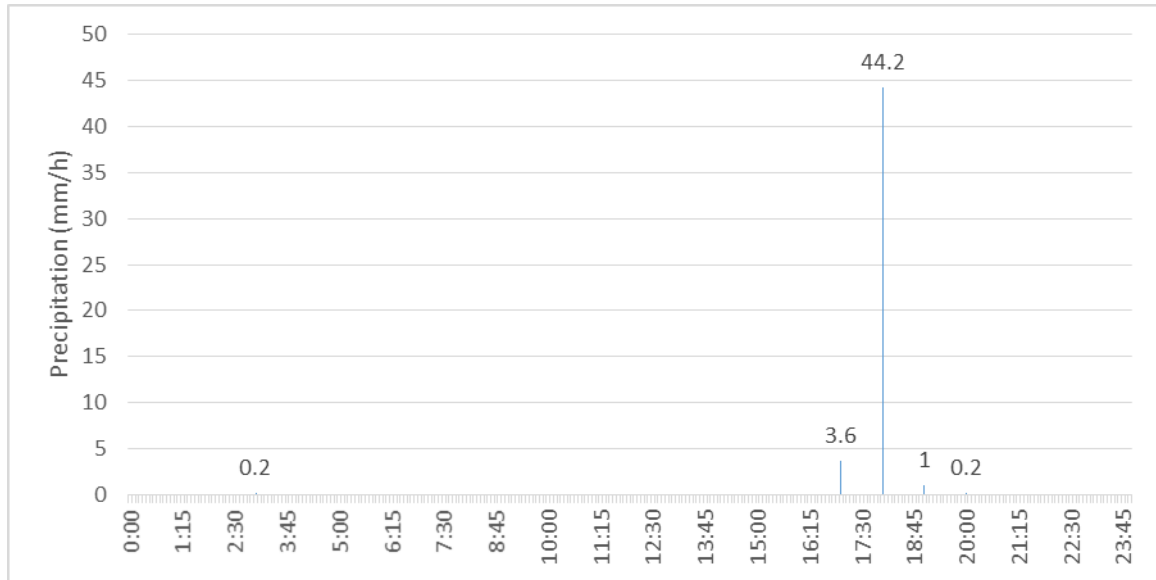


Figura 47. Precipitación horaria para el día 22 de Julio de 2015.

#### 6.2.2.1 Potencial Hídrico (Succión)

Se observa que el suelo presenta un comportamiento similar a cuando se encuentra húmedo. Una posible justificación es el hecho que ha retenido agua desde el día anterior en la capa más superficial, como se puede apreciar en la Figura 48.

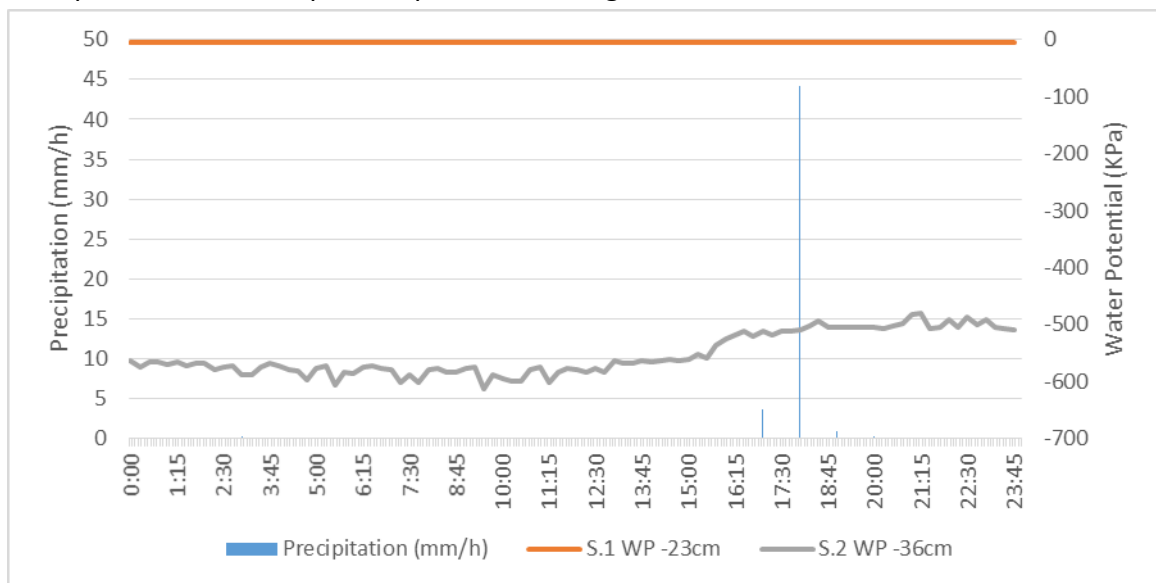


Figura 48. Respuesta del suelo con relación al potencial hídrico.

Si se analiza la respuesta de los sensores, se nota que el S.1 WP -23cm permanece constante en un estado que lo asemeja a un suelo saturado, mientras que el S.2 WP -36cm parece no ser afectado por el agua. Una posibilidad sería el hecho que el sensor más alejado de la superficie no responda con rapidez a una precipitación intensa de corta duración, por la razón que la cantidad de agua que se encuentra en los poros no es suficiente para continuar infiltrándose por gravedad y queda retenida por la capilaridad.

Cuando el frente húmedo llega a la capa del sensor S.1 WP -23cm, la succión y cohesión aparente del mismo comienza a disminuir. Sin embargo, si la intensidad no es lo suficiente fuerte para causar que el frente húmedo avance hasta el sensor S.2 WP -36cm, la succión en el suelo que envuelve a este sensor no se verá afectada.

### 6.2.2.2 Contenido de agua

Las respuestas obtenidas por los sensores indican que el suelo que los envuelve a ambos responde a una lluvia intensa de corta duración. En la Figura 49 se puede apreciar esta respuesta con relación a la precipitación horaria.

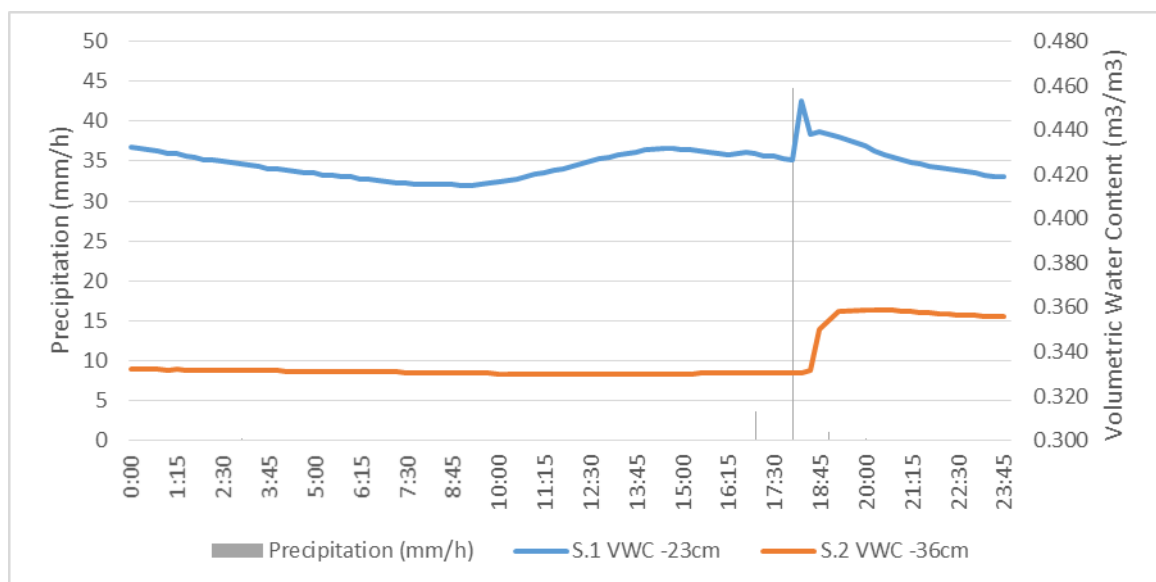


Figura 49. Respuesta del suelo ante el cambio del contenido de agua.

Se observa que para ambos sensores, correspondiendo a diferentes profundidades, su comportamiento es muy parecido. Tanto el sensor S.1 VWC -23cm como el S.2 VWC -36cm responden con rapidez a un aumento en su contenido de agua cuando se tiene una lluvia de alta intensidad horaria. La diferencia entre sus respuestas se puede observar en que la capa

que envuelve al sensor S.1 VWC -23cm, al momento de comenzar la lluvia presenta mayor retención de agua. Luego de poco tiempo, se ve como el contenido de agua en el suelo comienza a disminuir. Sin embargo, a medida que la capa superior tiene una disminución en su contenido de agua, la capa que envuelve al sensor S.2 VWC -36cm presenta un aumento. Esto nuevamente podría indicar el movimiento del frente húmedo relacionado a episodios de lluvia de corta duración y alta intensidad.

### 6.2.2.3 Piezometría

Los cambios en la presión de poros obtenidos por el piezómetro se muestran en la Figura 50.

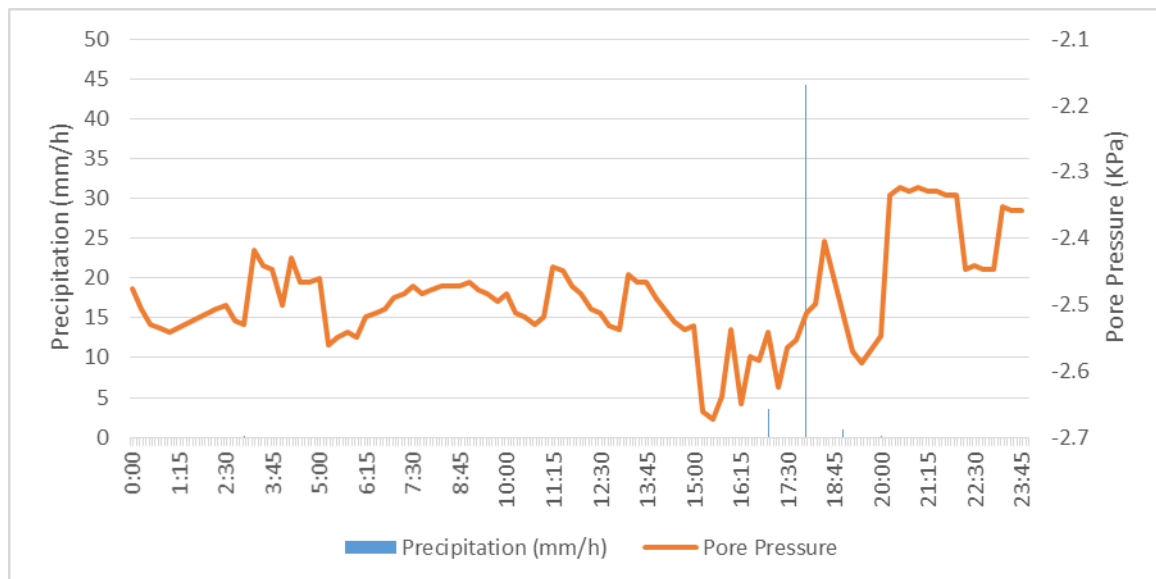


Figura 50. Reacción del suelo con relación la variación piezométrica.

Las oscilaciones registradas, por un posible aumento en el nivel freático, no afectan la estabilidad de la ladera. A pesar que la precipitación horaria más intensa fue registrada a las 16:00h, las presiones de poro se mantienen negativas, simbolizando que las fuerzas de succión siguen presente.

### 6.2.2.4 Desplazamiento

Las lecturas registradas ante un posible desplazamiento son ilustradas en la Figura 51.

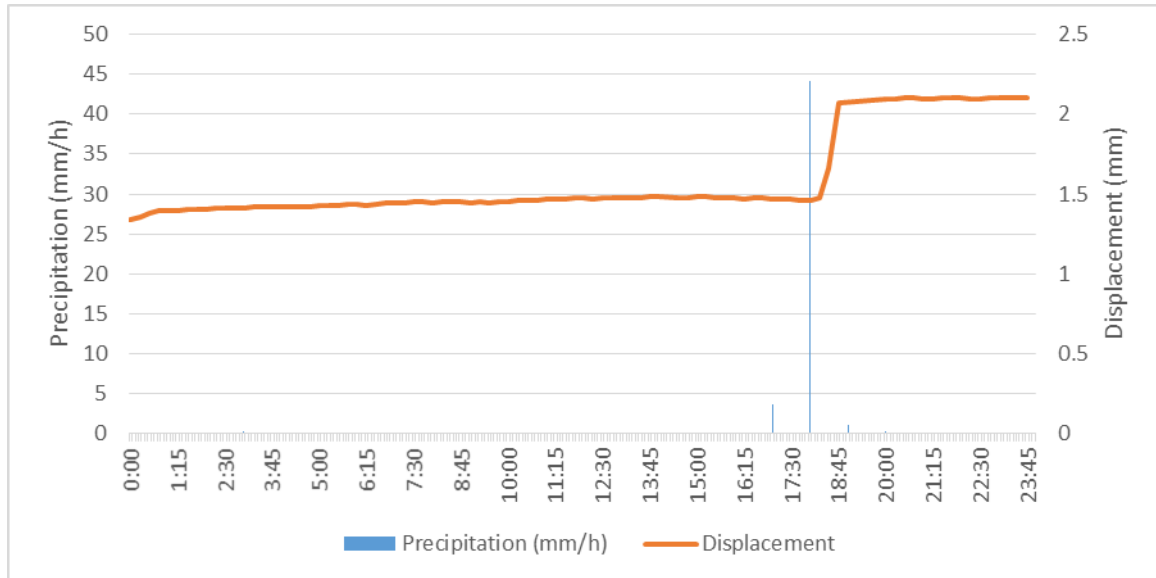


Figura 51. Reacción del suelo con relación a un desplazamiento.

El terreno presenta un desplazamiento poco significativo después de las 16:00h tras recibir la máxima precipitación horaria del año. Su reacción es parecida al análisis del episodio de larga duración. De acuerdo con su respuesta, el suelo presenta un movimiento de 0.6 mm al recibir una precipitación horaria de alta intensidad.

### 6.2.3 Correlación entre la precipitación y la respuesta del suelo.

A continuación se muestra una relación entre los 10 episodios más intensos del año y las respuestas del suelo registradas independientemente por cada instrumentación. El resumen de estos eventos puede apreciarse en la sección de Anexos II.

#### 6.2.3.1 Precipitación y el potencial hídrico

En la Figura 52 se muestra la relación que existe entre la máxima precipitación diaria y los cambios en el potencial hídrico del suelo para el sensor S.1 WP -23cm.

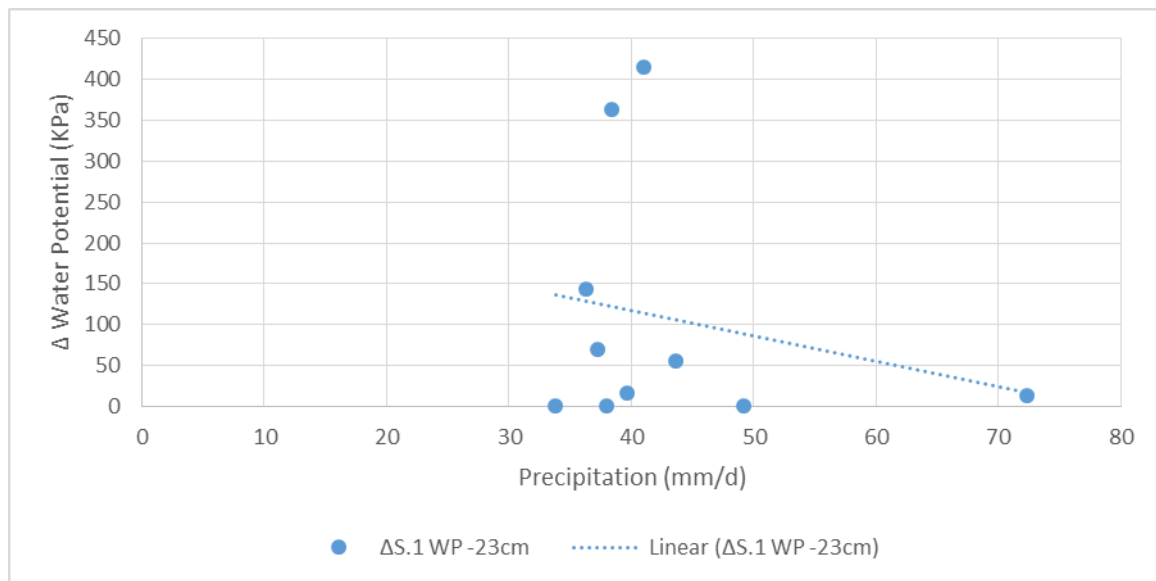


Figura 52. Máxima precipitación diaria con relación al cambio en el potencial hídrico para el sensor S.1 WP -23cm.

Se interpreta de la figura anterior, que a medida que la precipitación es mayor, la succión tiende a sufrir menos cambios. Los cambios registrados para los días cercanos a la línea de tendencia fueron menores de 100 kPa. Estos corresponden al sensor S.1 WP -23cm y ocurren con precipitaciones entre 30 - 50 mm/d. En otros casos, bajo precipitaciones similares, los cambios de succión registrados fueron de 350-450 kPa. La misma respuesta se observa cuando se hace una comparación entre las máximas precipitaciones horarias y las respuestas de este sensor. Estas se representan en la Figura 53.

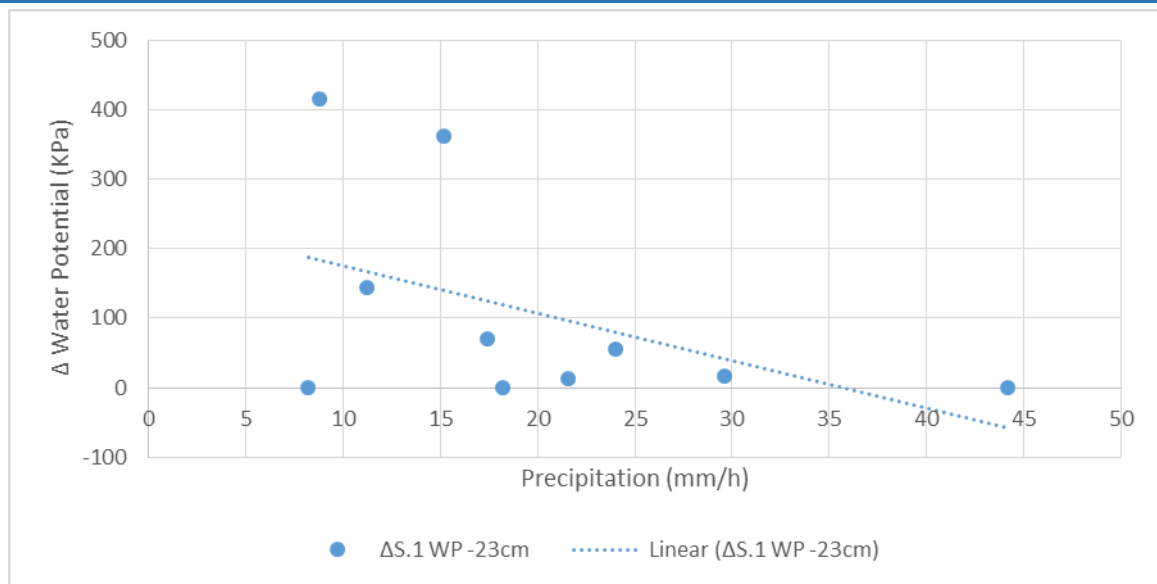


Figura 53. Máxima precipitación horaria con relación al cambio del potencial hídrico para el sensor S.1 WP -23cm.

En la figura anterior se puede apreciar que los cambios observados en la succión poseen mayor relación para precipitaciones máximas horarias que para máximas diarias. Los mayores cambios de succión se obtienen con intensidades entre 15-30 mm/h. Sin embargo, para el sensor que se encuentra más alejado de la superficie, sus respuestas son contrarias a estas y se representan en la Figura 54.

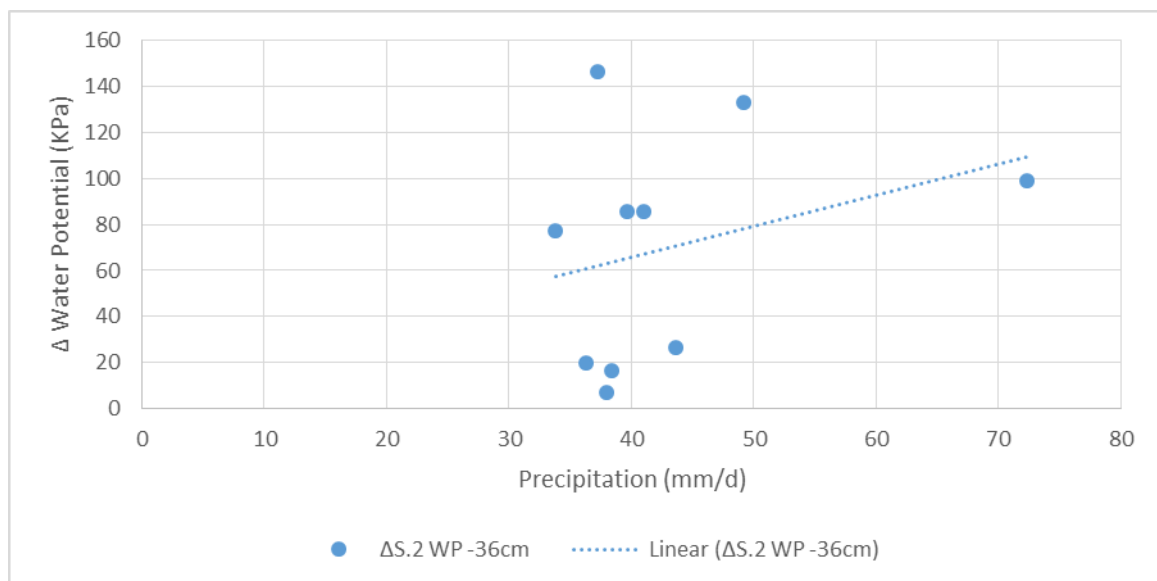


Figura 54. Máxima precipitación diaria con relación al cambio en el potencial hídrico para el sensor S.2 WP -36cm

Para el sensor S.2 WP -36cm, a medida que la precipitación aumenta la intensidad, la succión tiende a sufrir mayores cambios. Estos cambios observados cercanos a la línea de tendencia fueron entre 30-45 mm/d, con una variación en la succión cercana a los 80 kPa. Una respuesta parecida se observa cuando se relaciona con las máximas precipitaciones horarias, ilustradas en la Figura 55.

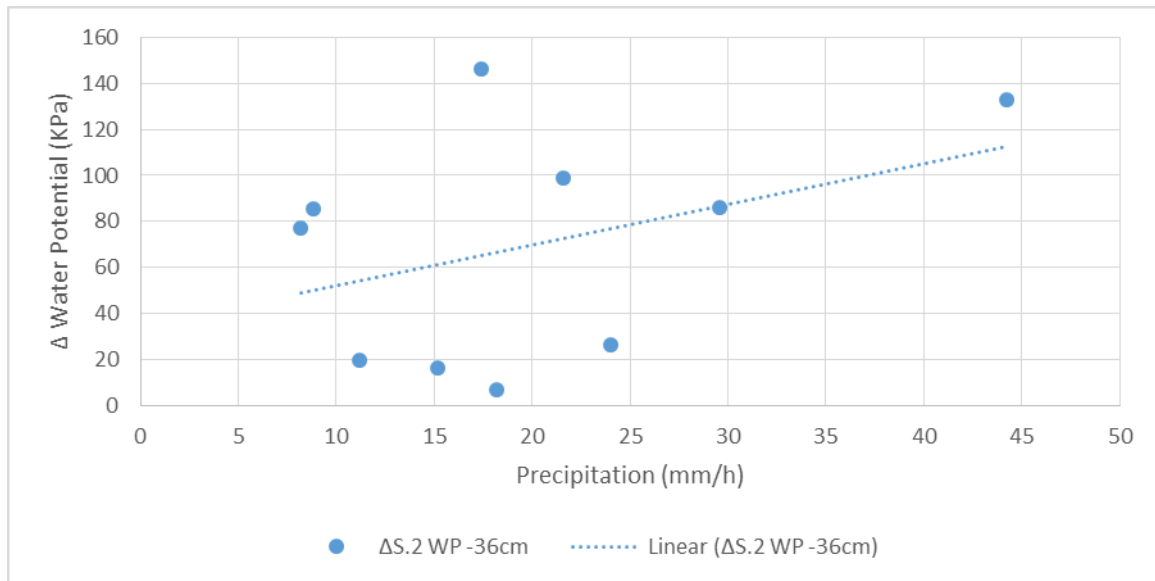


Figura 55. Máxima precipitación horaria con relación al cambio del potencial hídrico para el sensor S.2 WP -36cm

De la figura anterior se puede inferir que mayor sea la intensidad de la precipitación horaria, mayores son los cambios presentes en la succión del suelo que rodea el sensor S.2 WP -36cm. A diferencia del S.1 WP -23cm, los cambios en la succión se producen con precipitaciones máximas horarias entre 15-25 mm/h.

### 6.2.3.2 Precipitación y el contenido de agua

En la Figura 56 se muestra la relación que existe entre las máximas precipitaciones diarias y los cambios en el contenido de agua presentes en el suelo para el sensor S.1 VWC -23cm.

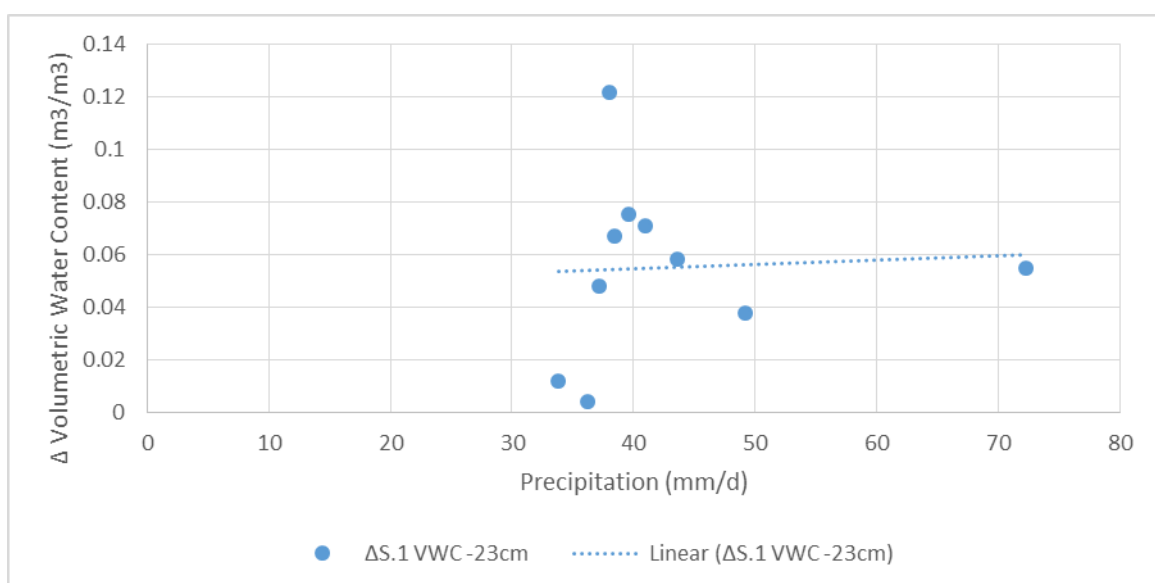


Figura 56. Máxima precipitación diaria con relación al cambio en el contenido de agua para el sensor S.1 VWC -23cm



Se observa en la figura anterior que para las precipitaciones comprendidas entre 35-45mm/d, los cambios promedio en el contenido de agua cercanos a la línea de tendencia, oscilan entre 0.06 - 0.08 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Su respuesta tiene semejanza cuando se compara con la máxima precipitación horaria, como se puede ver en la Figura 57.

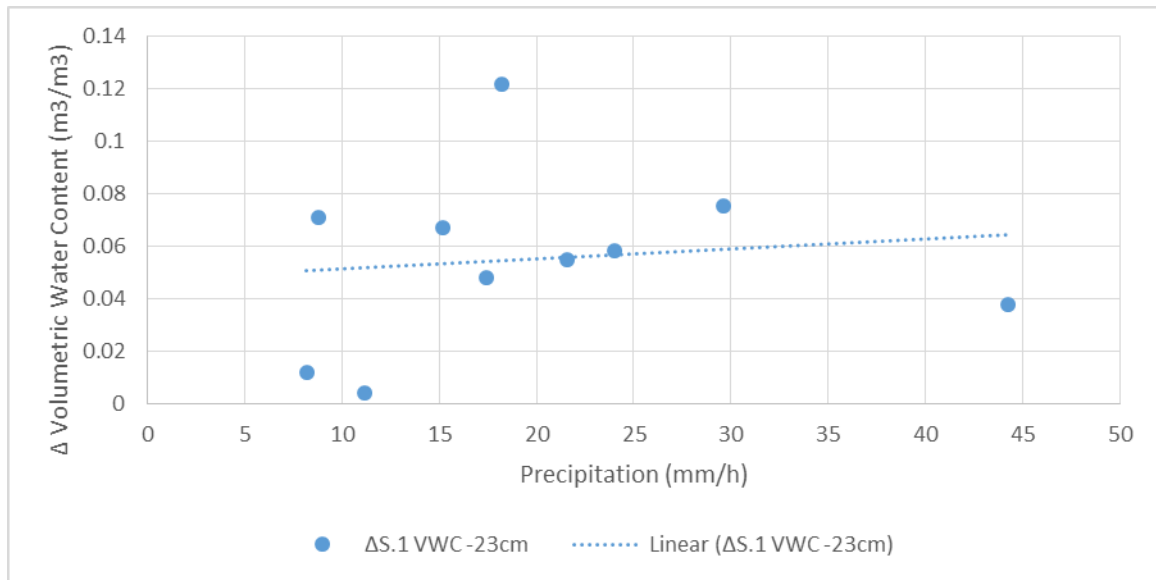


Figura 57. Máxima precipitación horaria con relación al cambio del contenido de agua para el sensor S.1 VWC -23cm

El S.1 VWC -23cm responde con mayor cambio en el contenido de agua a medida que la precipitación aumenta la intensidad. Cuando las precipitaciones horarias se encuentran entre 15 – 25 mm/h, se percibe un cambio en el contenido de agua cercano a 0.06 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Contrario a esto, para el S.2 VWC -36cm los mayores cambios en el contenido de agua se observaron con lluvias de larga duración con valores de 35 - 40 mm/d, correspondiendo a valores cercanos a 0.025 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> y representados en la Figura 58.

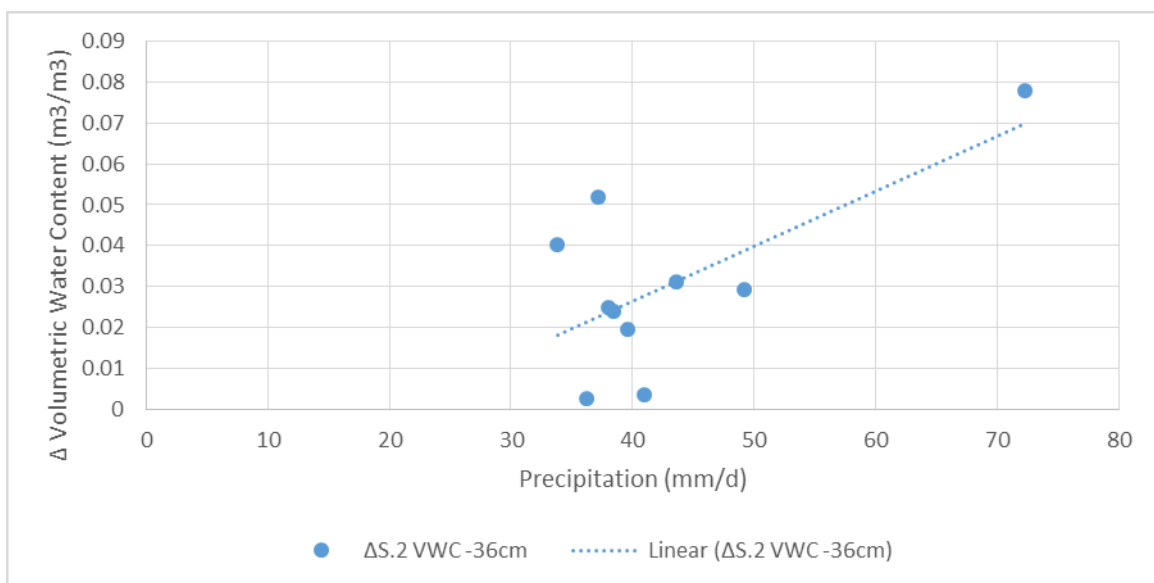


Figura 58. Máxima precipitación diaria con relación al cambio en el contenido de agua para el sensor S.2 VWC -36cm.

El sensor S.2 VWC -36cm responde muy parecido al sensor más cercano a la superficie. A medida que la intensidad es mayor, el contenido de agua tiende a sufrir mayores cambios. En este caso, para intensidades de 15 – 30 mm/h, los cambios en el contenido de agua cercanos a la línea de tendencia fueron inferiores a  $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . También se presentaron ocasiones en el cual para precipitaciones cercanas a 20 mm/h, los cambios en el contenido de agua fueron entre  $0.05 - 0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

En la Figura 59, mostrada a continuación, se puede apreciar que los cambios registrados en el contenido de agua poseen mayor relación con precipitaciones máximas horaria (lluvias intensas de poca duración) que para episodios de máxima precipitación diaria (lluvias poco intensas de larga duración).

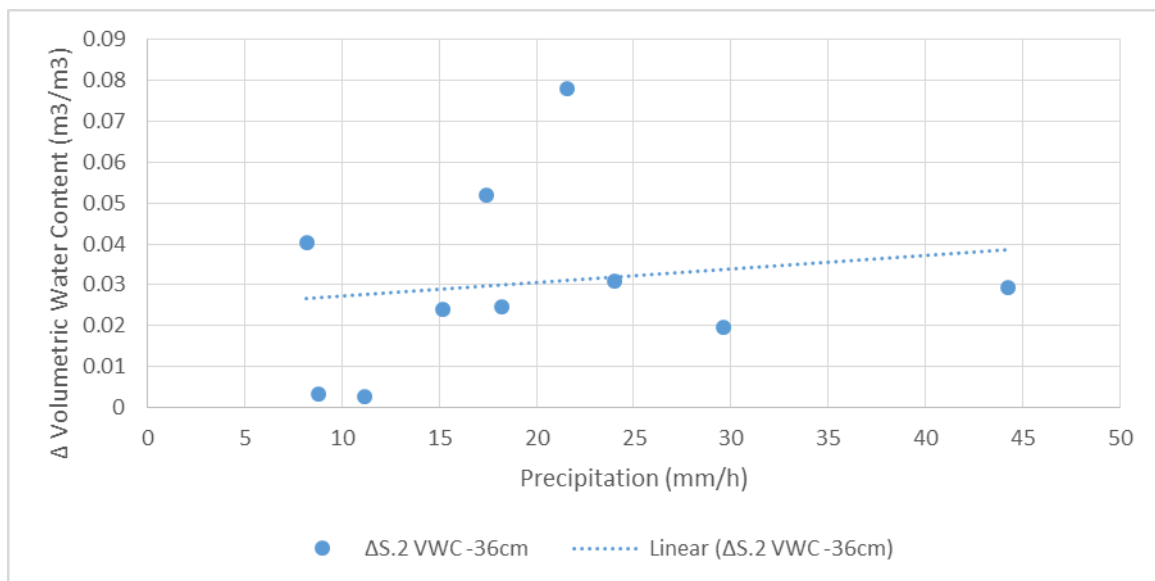


Figura 59. Máxima precipitación horaria con relación al cambio del contenido de agua para el sensor S.2 VWC -36cm

### 6.2.3.3 Precipitación y el piezómetro

En la Figura 60 se muestra la relación que existe entre los días de máxima precipitación diaria y los cambios observados en las oscilaciones del piezómetro.

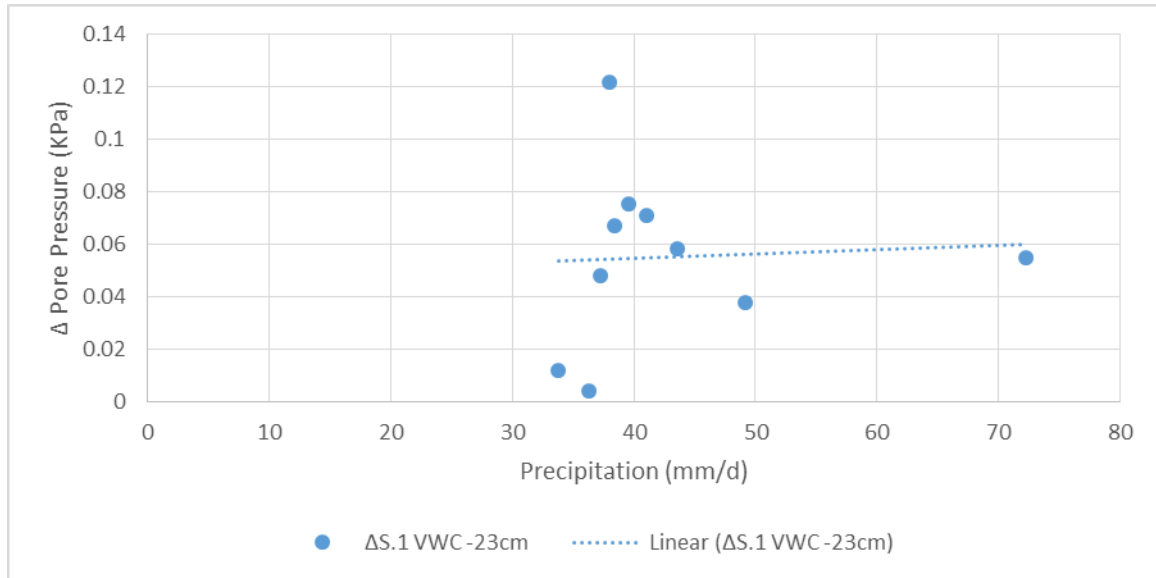


Figura 60. Máxima precipitación diaria con relación a los cambios registrados por el piezómetro.

Se puede inferir por la respuesta del suelo que mayor sea la intensidad de la precipitación diaria, mayor será el cambio de presión. Se observa como para precipitaciones cercanas a 40 mm/d, los cambios en la presión de poros 0.3 - 0.4 kPa. También se presenta el caso en que se registra una lluvia acumulada de 72.26 mm/d, con unos cambios de presión de 0.7 kPa. Por otro lado, cuando se compara su comportamiento con la máxima intensidad horaria, se observa que los cambios también se presentan con precipitaciones inferiores a 20 mm/h.

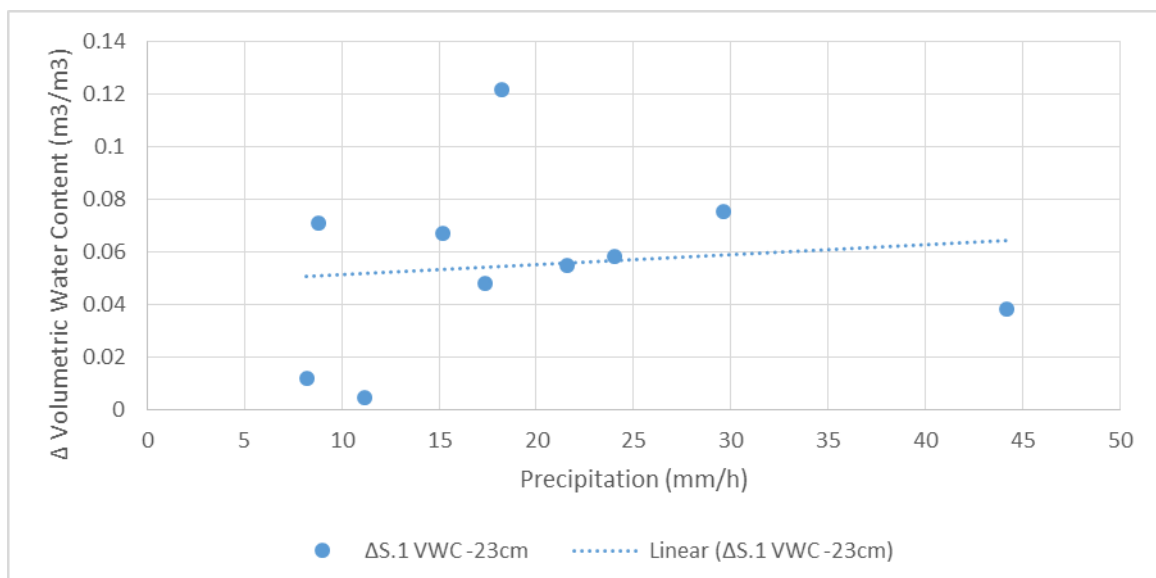


Figura 61. Máxima precipitación horaria con relación a los cambios registrados por el piezómetro.

### 6.2.3.4 Precipitación y el desplazamiento

En la Figura 62 se observa la relación que hay entre los días con mayor precipitación diaria y los desplazamientos sufridos por el suelo.

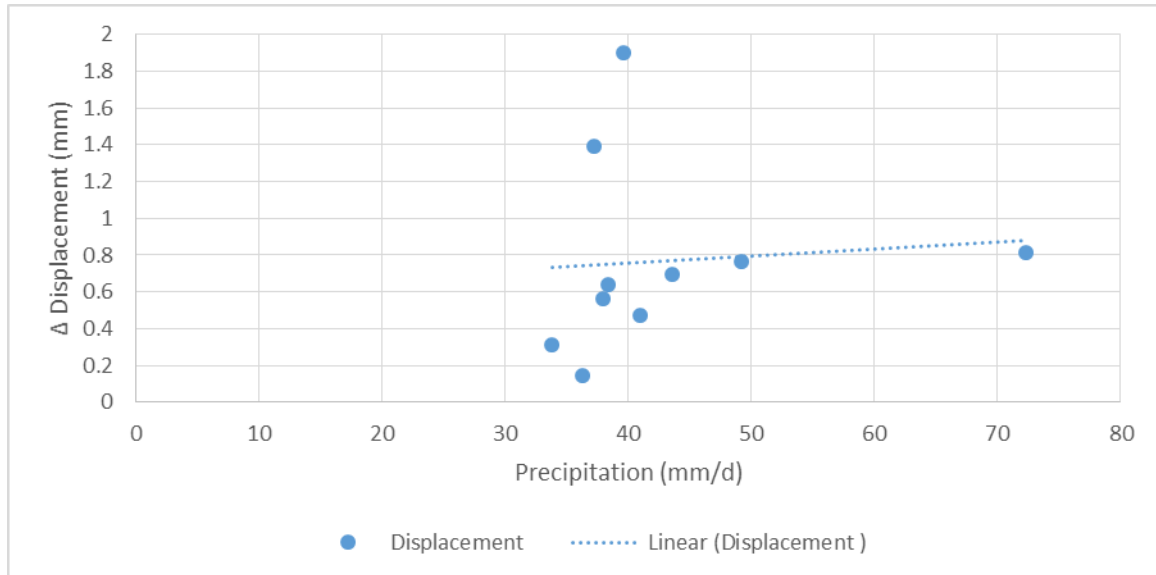


Figura 62. Máxima precipitación diaria con relación al cambio en los desplazamientos.

Por medio de este gráfico se interpreta que el suelo sufre pequeños desplazamientos cuando se tienen lluvias acumuladas. Los desplazamientos que más se asemejan a la línea de tendencia registran un valor menor a 0.8 mm. Sin embargo, un día que presenta una precipitación similar se desplaza el suelo cerca de 2 mm. Si se hace una comparación con la lluvia máxima horaria, se obtiene que hay mayor relación entre la misma y el desplazamiento del suelo.

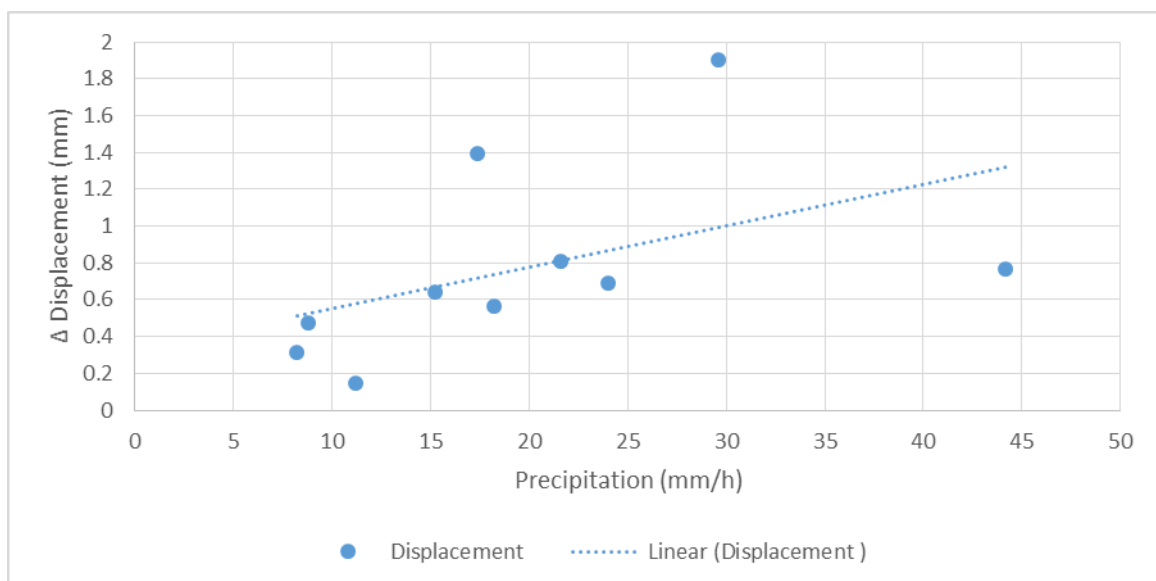


Figura 63. Máxima precipitación horaria con relación al cambio en los desplazamientos.

## 7. Cálculo de Estabilidad

En la sección 3.3 se explicaron los conceptos básicos que definen un análisis de estabilidad para un talud y con qué fines se utilizan. En resumen, los análisis de estabilidad se encargan de analizar la condición de estabilidad que presenta una ladera, basándose en métodos que relacionan las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud. Se hace un análisis determinístico para este caso, en el cual se evaluarán diversas condiciones de equilibrio por medio del factor de seguridad (FS).

Para representar la situación actual de la ladera se utiliza el programa “SLIDE 6.0” de Rocscience. Este es un programa 2D, basado en el método de equilibrio, para evaluar el factor de seguridad de superficies circulares o no circulares, utilizando el método de rebanadas verticales.

### 7.1 Método de evaluación

Para hacer un análisis comparativo del comportamiento de la ladera frente a la precipitación, se hacen varios modelos. Su propósito es comprender que tan estable se encuentra y como podría desestabilizarse en un futuro.

#### *Condición actual:*

Se analizará la ladera en las condiciones que presentó el 2015. En este año, la ladera no recibe ningún aumento en las presiones positivas y se asume que el nivel freático se encuentra por debajo del piezómetro. Para fines del análisis, se considera que el piezómetro registra valores cercanos a la presión atmosférica.

#### *Saturación de las argilitas alteradas:*

Para este caso se supondrá un aumento del nivel freático que sature las argilitas alteradas.

#### *Saturación completa del terreno:*

En este caso se aumentará el nivel freático hasta saturar el terreno completo y se establecerá que factor de seguridad este presentaría.

### *Análisis de sensibilidad paramétrica:*

Se hace un análisis de como los valores del ángulo de rozamiento residual ( $\phi'_r$ ) podrían afectar la ladera en el caso que presenten discrepancias con el obtenido en el laboratorio. También se elabora un análisis de la evolución del nivel freático con relación a la falla del talud.

## **7.2 Datos de entrada**

Para que el programa "SLIDE 6.0" arroje los valores más aproximados a la realidad, es necesario recopilar los datos actuales del terreno. En esta sección se plantearán los mismos y la justificación de los valores escogidos.

### **7.2.1 Geometría de la superficie**

#### **7.2.1.1 Contorno Exterior**

En la sección 5.3 se describe brevemente la topografía de la región, pero al momento de definir la zona de deslizamiento se utilizaron los datos obtenidos por Carlos Pernia (2015). Este cuenta con un levantamiento topográfico en la dirección longitudinal obtenido con el uso de una estación total.

Según Pernia (2015), el proceso que se siguió para la realización del levantamiento consistió en definir tres estaciones de radiación de puntos. Se colocó una estación bajo el pie del deslizamiento, la otra al este del deslizamiento y la última al oeste.

#### **7.2.1.2 Contornos Interiores (sustratos y superficie de falla)**

Para representar el coluvión, las argilitas alteradas e inalteradas, se utilizaron las divisiones de muestras observadas por un estudio de campo promovido por la Universidad Politécnica de Catalunya. Estas identificaron las separaciones entre cada estrato, representadas en la Figura 19. Mediante aproximaciones, estas fueron ingresadas a una hoja de cálculo para luego exportarlo a "SLIDE". Por medio de este estudio también se obtuvo un estimado de la superficie de falla con relación a la actual.

### 7.2.1.3 Coordenadas

Para representarlos bajo un solo plano de coordenadas, se ajustaron las coordenadas manualmente utilizando un programa CAD. Luego se procedió a exportarlo como DXF para que SLIDE pueda interpretarlas y utilizarlo como un “*boundary*” o contorno. A continuación se puede ver el resumen de coordenadas extraídas:

Tabla 7. Resumen de coordenadas cartesianas utilizadas.

Contorno Exterior		Coluvión		Argilitas		Superficie de falla	
x	y	x	y	x	y	x	y
37.097	17.621	3.767	10.1878	14.57	12.142	11.90588	11.98594
36.526	17.621	7.15	10.726	15.539	12.359	12.743	12.073
35.93291	17.33453093	11.82643	11.34087	17.595	12.836	13.952	12.142
35.849	17.294	11.85983	11.35038	18.694	13.167	14.572	12.197
34.979	17.178	12.80734	11.67009	20.302	13.51	15.545	12.435
33.556	17.178	13.75591	11.99016	22.491	14.044	17.539	12.876
31.674	17.064	13.80464	12.00981	23.288	14.186	18.677	13.235
27.425	16.392	13.82	12.016	24.377	14.511	20.292	13.544
25.532	16.059	13.94699	12.05874	25.756	14.9	22.476	14.1
23.723	15.558	14.0831	12.1048	26.429	15.088	23.272	14.248
23.068	15.315	14.11605	12.11601	27.532	15.34	26.412	15.138
21.843	15.004	14.34988	12.19555	28.407	15.486	28.394	15.53
20.718	14.718	18.515	13.596	29.336	15.683	29.317	15.728
19.24	14.386	22.697	14.552	30.27	15.784	30.286	15.839
17.661	13.775	25.772	15.53	31.03	15.899	31.019	15.946
16.273	13.344	27.662	15.924	31.8	15.958	31.819	16.016
14.785	12.926	28.959	16.148	32.748	16.114	32.746	16.165
12.309	12.107	32.021	16.574	33.462	16.224	33.455	16.284
11.82742	11.9623781	34.615	16.832	33.92	16.224	33.904	16.284
11.59307	11.892	35.849	17.294	34.735	16.338	34.716	16.399
11.17095	11.76523543			34.7943691	16.3575147	35.28	16.61
11.007	11.716			35.0691565	16.4478376	35.87351	17.30584
8.949	11.434			36.606	16.953		
5.646699	10.726			43.434	18.5858396		
3.767	10.323						
3.767	10.18779842						
3.767	8.318						

### 7.2.2 Propiedades de los materiales

De acuerdo a que cada estrato posee características diferentes, observadas en el análisis de laboratorio de la Figura 19, se le asigna un color diferente para cada división. Sus características se muestran a continuación:

Tabla 8. Resumen de propiedades mecánicas asignados al modelo de estabilidad.

Estrato	Propiedades mecánicas			Descripción
	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	
<b>Coluvión</b>	2.94	26	14	Representa el material deslizado. Este tiene una separación promedio de 45 (5cm de capa vegetal y 40 cm de coluvión) con relación a la superficie del terreno.
<b>Argilitas alteradas</b>	0	14.4	17.5	Representa la parte del sustrato deslizado. Esta tiene un espesor de 45 cm por debajo del coluvión.
<b>Argilitas inalteradas</b>	18.62	29.5	20	Representa un sustrato intacto que se encuentra por debajo de los 90 cm.

### 7.2.3 Modelamiento de la superficie

Se importan las coordenadas anteriormente mencionadas y se le asigna las propiedades a cada material. Los estratos fueron asignados con un color diferente para facilitar la interpretación. En la figura a continuación se representan los diferentes estratos junto con la superficie de falla. También se aprecia la ubicación con respecto a la ladera donde se encuentra el piezómetro.

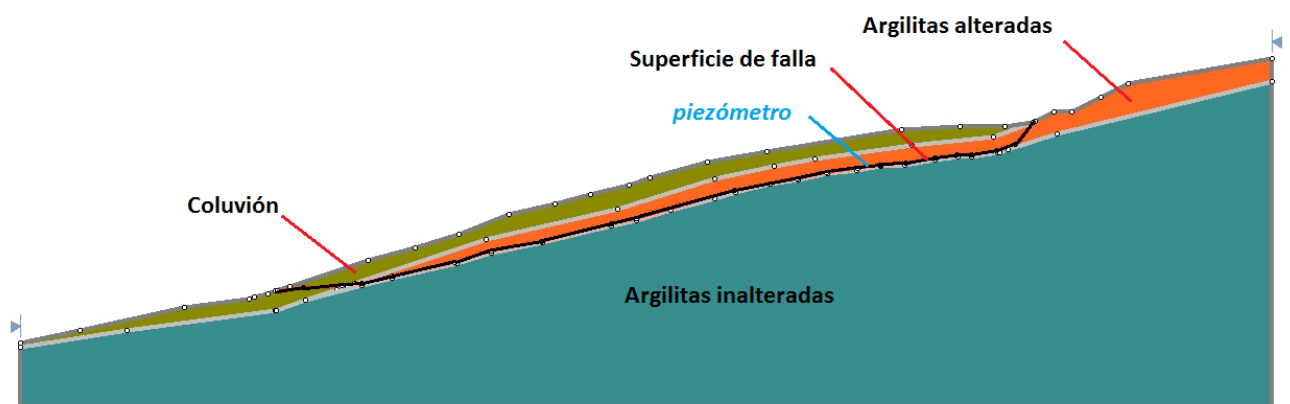


Figura 64. División de estratos dentro de la modelación.



### 7.2.4 Hipótesis del análisis

Para el análisis de estabilidad se han establecido las siguientes hipótesis:

- El método principal de análisis utilizado para determinar el factor de seguridad es *Bishop simplificado*. Se utilizan *Janbu simplificado* y *corregido* para comparación.
- Se ha asumido para los suelos el criterio de rotura *Mohr-Coulomb*.
- Se asumió una cantidad de 50 rebanadas con una tolerancia de 0.005.
- El método para el agua subterránea utilizado fue: *water surface* o *superficie de agua*
- El nivel freático se asume paralelo a la superficie.
- El tipo de superficie de falla utilizada: *no-circular*.

### 7.3 Condición Actual

Como se observó en el año 2015, los registros del piezómetro solamente presentan succión. Por esta razón se entiende que el nivel del agua no supera la altura de 85cm (profundidad que se encuentra el piezómetro por debajo de la superficie). Al presentar oscilaciones de succión (presiones negativas), no puede establecerse la profundidad del nivel freático. Por ende, este análisis asume que se encuentra al mismo nivel del piezómetro, ilustrado en la figura 65.

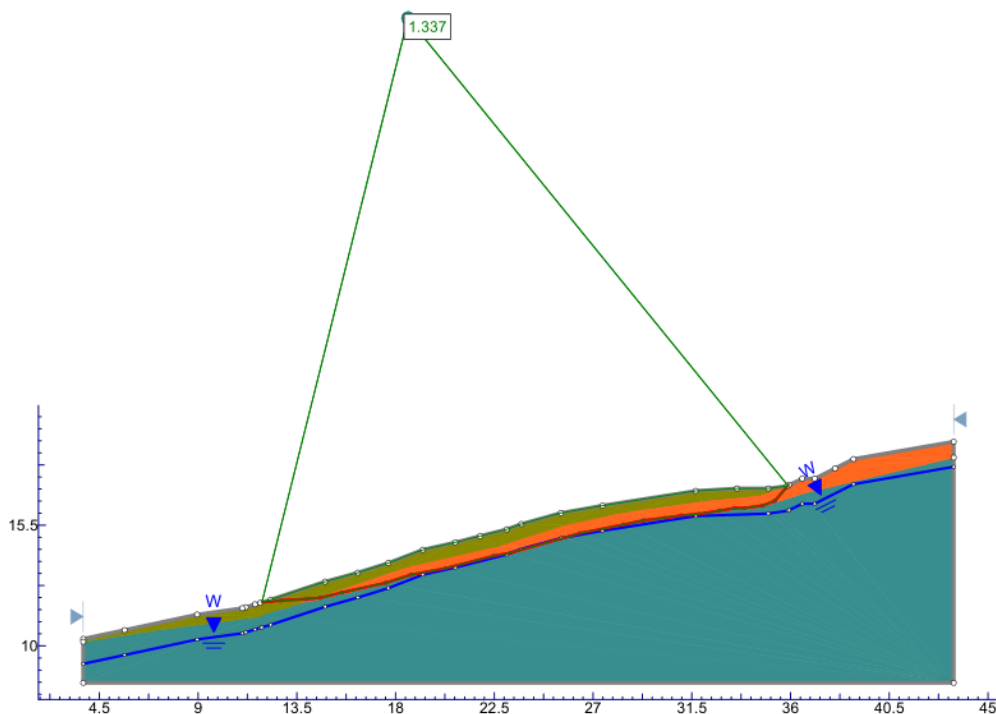


Figura 65. Factor de seguridad para la situación actual de Cercs.

Se observa como la ladera se mantiene estable aun el nivel freático aumente hasta llegar a presión atmosférica. El FS utilizado para la representación de la Figura 65 pertenece al método simplificado de Bishop. Los factores de seguridad para los métodos escogidos son representados en la Tabla 9:

Tabla 9. Resumen de factores de seguridad para la condición actual.

<b>Método</b>	<b>Factor de seguridad (FS)</b>
Bishop simplificado	1.337
Janbu simplificado	1.326
Janbu corregido	1.342

Con referencia al plano cartesiano de la Figura 65, se hace una representación gráfica de tanto la resistencia al corte como del esfuerzo cortante. Esta se puede observar a lo largo de la superficie de falla en la figura a continuación:

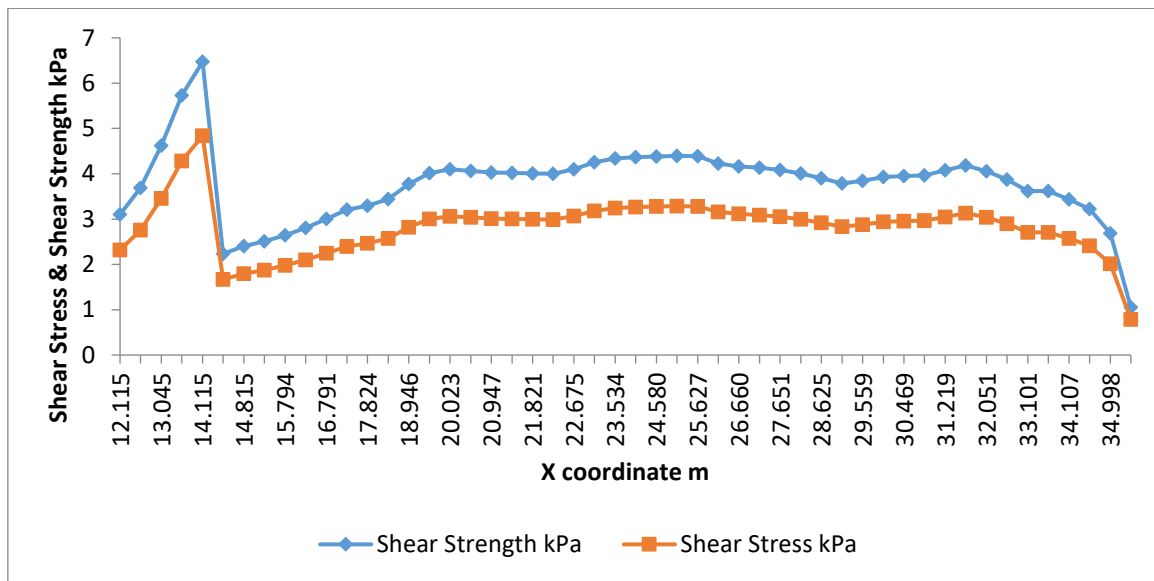


Figura 66. Relación del esfuerzo cortante con la resistencia al corte.

La resistencia al corte no es muy alta en comparación al esfuerzo cortante que se ejerce en la falla, significando que poca presión de agua puede hacer que la resistencia al corte disminuya. También se puede observar que la zona de falla del talud que presenta menor resistencia al corte es la cabeza. Si esta se compara con el esfuerzo cortante, contrario a lo anterior, el pie del talud representa la parte con mayor resistencia al corte.

#### 7.4 Saturación Argilitas Alteradas

En este análisis, el nivel freático asciende hasta saturar todo por debajo de las argilitas alteradas. Esto quiere decir que el agua se debe encontrar aproximadamente a 40 cm por debajo de la superficie del coluvión. Los resultados del factor de seguridad del modelo se muestran en la Figura 67.

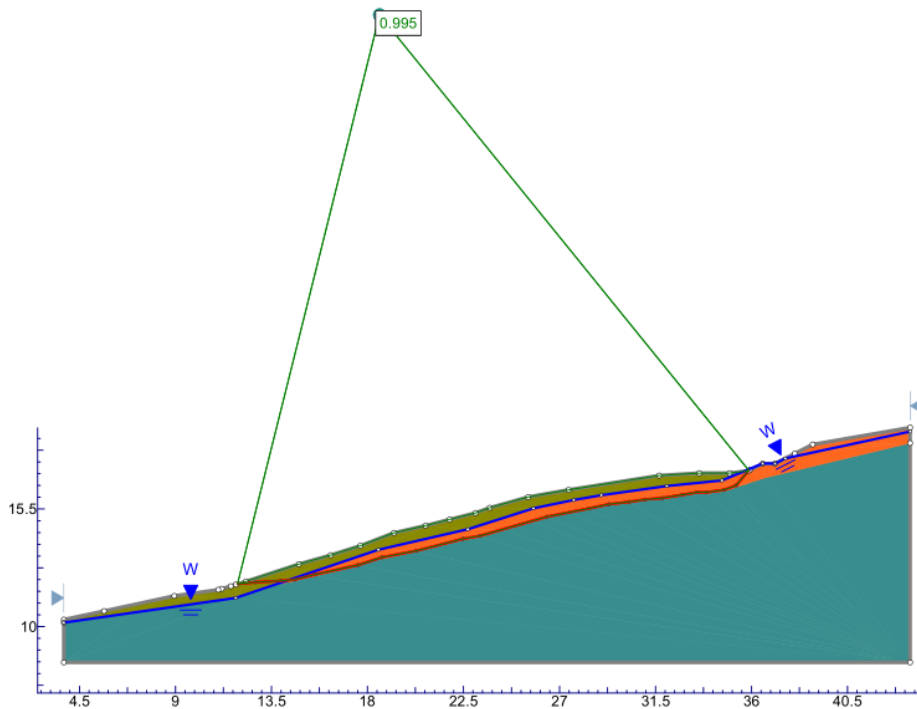


Figura 67. Factor de seguridad para las argilitas saturadas.

El factor de seguridad para los métodos escogidos se muestra a continuación:

Tabla 10. Resumen de factores de seguridad para la condición actual.

<b>Método</b>	<b>Factor de seguridad (FS)</b>
<i>Bishop simplificado</i>	0.995
<i>Janbu simplificado</i>	0.978
<i>Janbu corregido</i>	0.990

En la Figura 67 se puede observar como la ladera tiende a fallar a medida que el nivel freático satura las argilitas alteradas, causando que el esfuerzo cortante alcance la resistencia al corte. Este comportamiento se muestra en la Figura 68.

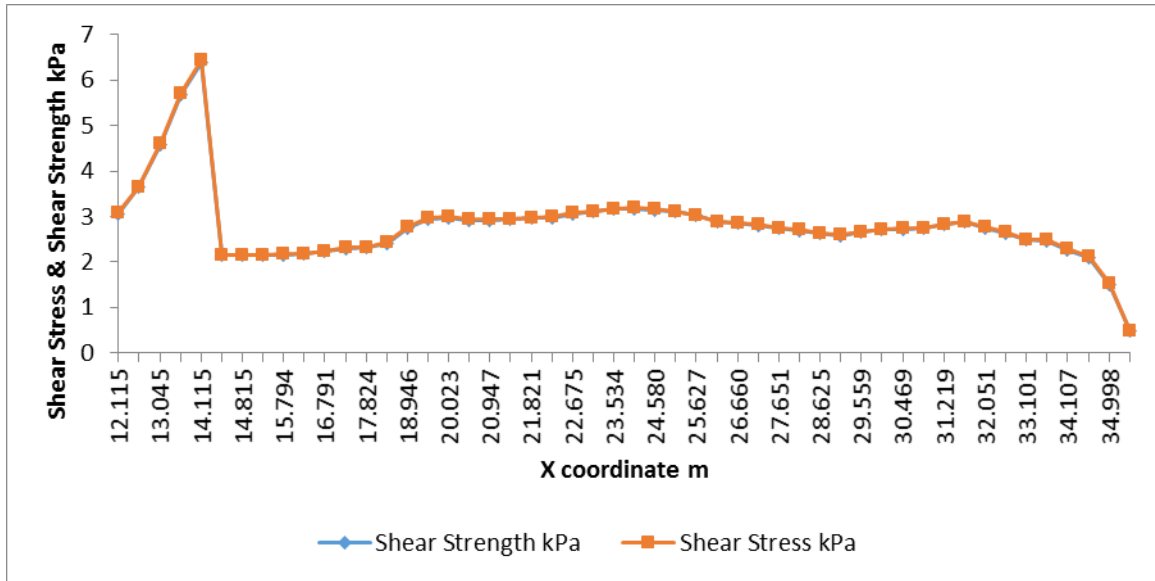


Figura 68. Relación del esfuerzo cortante con la resistencia al corte.

### 7.5 Saturación completa del terreno

El análisis anterior comprueba que cualquier aumento del nivel freático por encima del nivel de las argilitas alteradas provoca la falla del talud. Debido a que el comportamiento del suelo en ese punto también está muy cerca a la estabilidad, se desea saber con este análisis que tan brusco es el cambio del factor de seguridad ante la saturación completa del talud. En la Figura 69 se muestra el factor de seguridad para este caso:

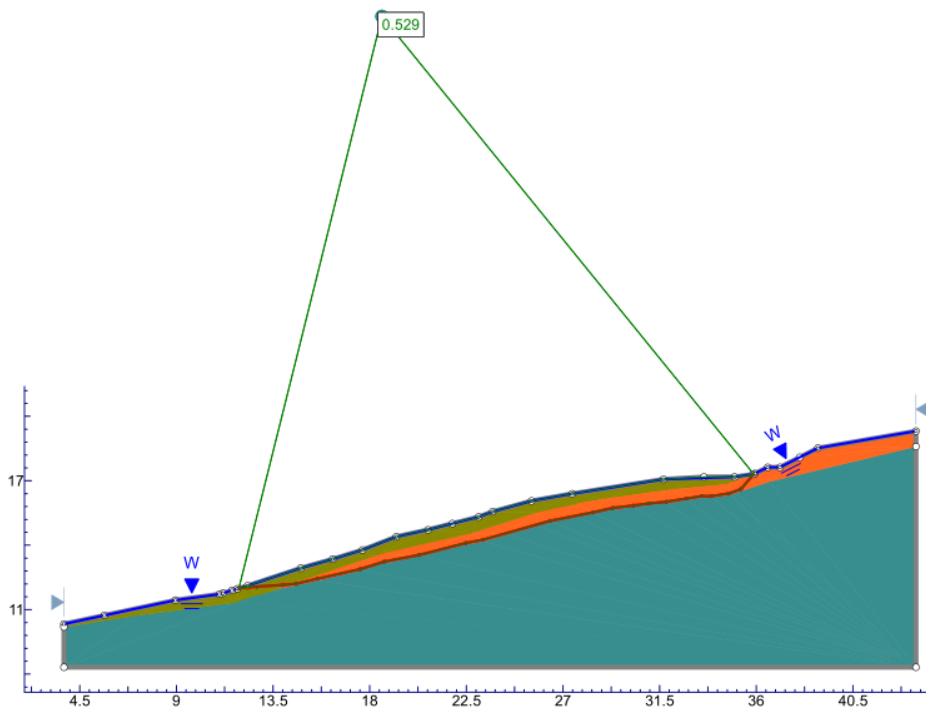


Figura 69. Factor de seguridad para la saturación completa del talud.

El factor de seguridad para los métodos escogidos se muestra a continuación:

Tabla 11. Resumen de factores de seguridad para la condición actual.

<b>Método</b>	<b>Factor de seguridad (FS)</b>
<i>Bishop simplificado</i>	0.528
<i>Janbu simplificado</i>	0.519
<i>Janbu corregido</i>	0.525

En la Figura 70 se puede observar el esfuerzo cortante supera la resistencia al corte.

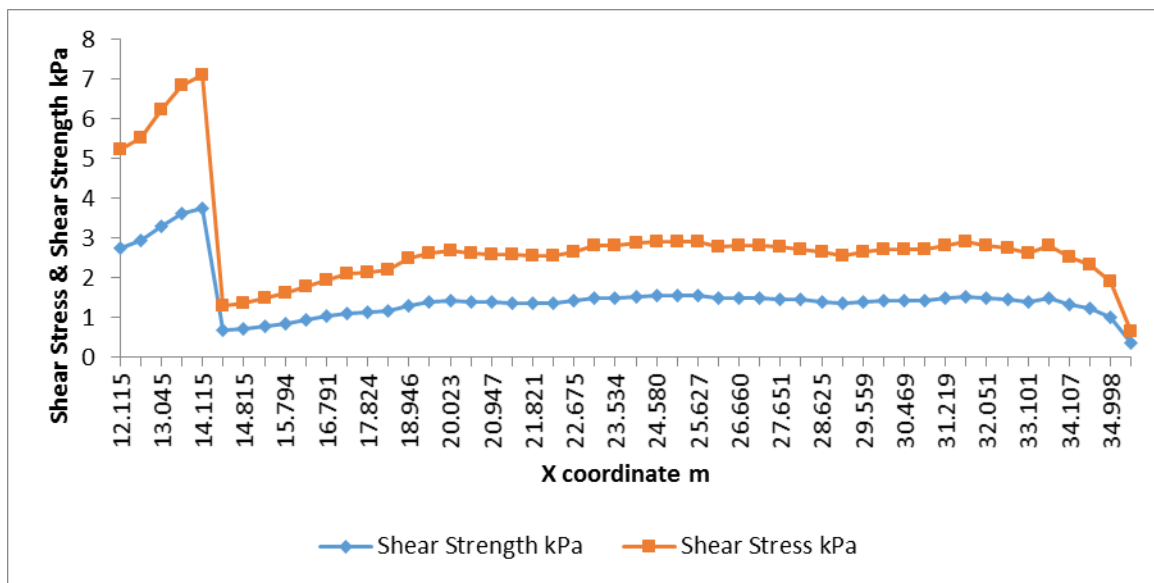


Figura 70. Relación del esfuerzo cortante con la resistencia al corte.

## 7.6 Análisis de sensibilidad

Cuando se hace un análisis de estabilidad, los valores tomados en el laboratorio con relación a los simulados pueden tener discrepancias. El siguiente análisis tiene como objetivo ver la relación que existe entre el factor de seguridad y los parámetros resistentes del suelo. Algunos valores fueron alterados utilizando como referencia el valor conocido y haciendo estimaciones con posibles cercanos al mismo.

### 7.6.1 Angulo de rozamiento residual vs FS

Los valores a utilizar pertenecen solamente a las argilitas alteradas, que es el estrato en donde se encuentra la superficie de falla. Debido a que es un suelo residual, la cohesión se desprecia y el único parámetro que se analizará es el ángulo de rozamiento interno ( $\phi'$ ), teniendo un valor de  $14.4^\circ$ .

#### 7.6.1.1 Condición actual

En este análisis se procede a evaluar los rangos de valores representados en la Tabla 12 para el año 2015, cuya relación con la estabilidad del terreno es observada en la Figura 71.

Tabla 12. Rango de valores escogidos para la sensibilidad paramétrica de la condición actual.

Material	Valor medio	Valor mínimo relativo	Valor máximo relativo
argilitas alteradas	$14.4^\circ$	$8^\circ$	$8^\circ$

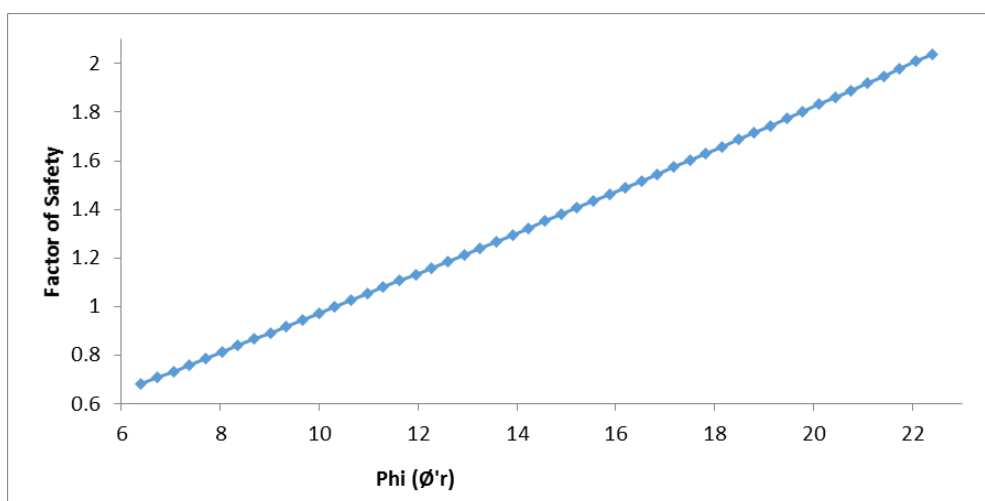


Figura 71. Relación entre el ángulo de rozamiento residual y el factor de seguridad para la condición actual.

Sabiendo que el nivel freático se encuentra por debajo de las argilitas alteradas en las condiciones actuales, el factor de seguridad  $FS$  es de 1.337. Si hubiese un error en la medida de  $\phi$ , la ladera se consideraría estable con un valor inferior de hasta un 28% de la media, correspondiendo a un  $\phi' = 10.34^\circ$  para un factor de seguridad ( $FS$ ) igual a 1. Esto se resume en que hay poco riesgo en que la ladera falle si el nivel freático tiende a mantenerse por debajo de las argilitas inalteradas, es decir, con una presión de agua igual o por debajo de 0 kPa.

### 7.6.1.2 Saturación argilitas alteradas

En este análisis se procede a evaluar los rangos de valores representados en la Tabla 13, cuya relación es observada en la Figura 72.

Tabla 13. Rango de valores escogidos para la sensibilidad paramétrica de la saturación de las argilitas alteradas.

Material	Valor medio	Valor mínimo relativo	Valor máximo relativo
argilitas alteradas	14.4°	6°	6°

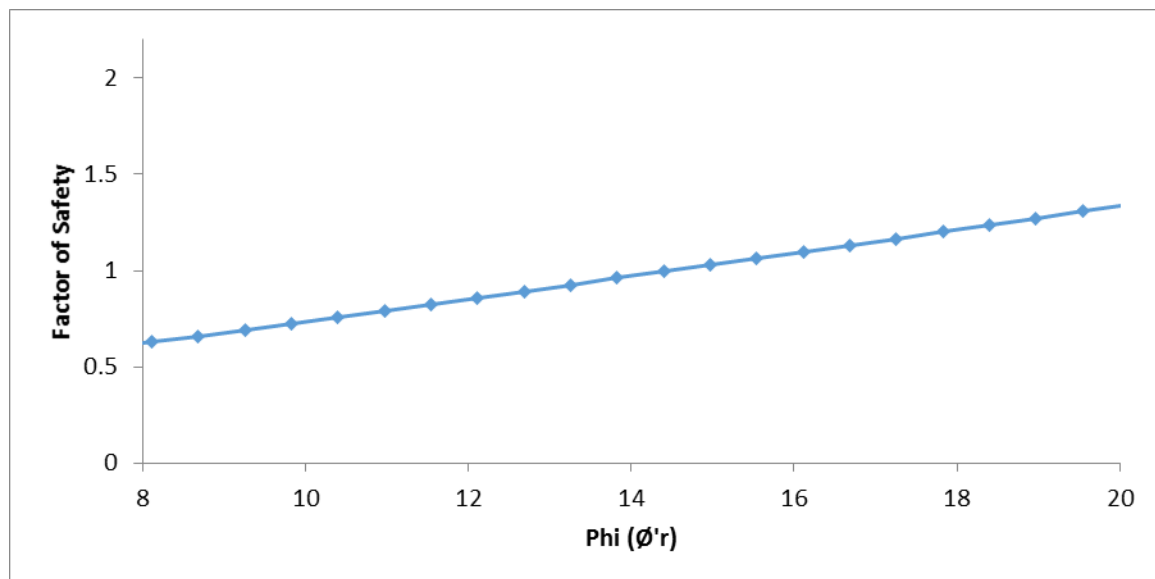


Figura 72. Relación entre el ángulo de rozamiento residual y el factor de seguridad para la saturación de las argilitas alteradas.

En el análisis de estabilidad para el caso que las argilitas alteradas están saturadas, el factor de seguridad  $FS$  es igual a 0.995 para Bishop simplificado, muy próximo a 1. Para que el  $FS$  cumpla con las condiciones de estabilidad de la ladera, el ángulo de rozamiento ( $\phi'$ ) debe ser igual a 14.49°. Esto significa que en caso que el ángulo de rozamiento sea +0.09 al actual, la ladera se encontraría en el borde de ser estable.

### 7.6.1.3 La saturación completa del terreno

En este análisis se procede a evaluar los rangos de valores representados en la Tabla 14, cuya relación es observada en la Figura 73.

Tabla 14. Rango de valores utilizado para el análisis de estabilidad de la saturación completa del talud.

Material	Valor medio	Valor mínimo relativo	Valor máximo relativo
argilitas alteradas	14.4°	6°	6°

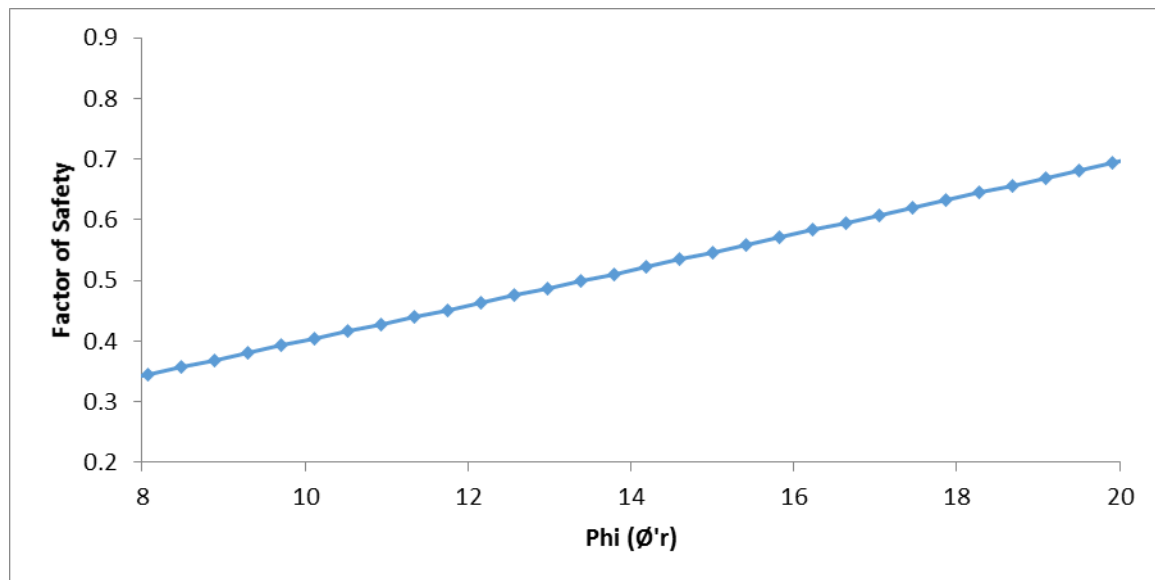


Figura 73. Relación entre el ángulo de rozamiento residual y el factor de seguridad para la saturación completa del talud.

A diferencia de los pasados, cuando la ladera se encuentra totalmente saturada, no hay un ángulo de rozamiento cercano al valor medio que haga cumplir una situación de estabilidad. Se concluye que no importa los posibles valores alejados a la realidad obtenidos en el laboratorio, el talud llegará a la falla tan pronto el coluvión comience a saturarse.

### 7.6.2 Nivel piezométrico vs FS

Tomando como referencia el nivel freático actual se hace un análisis de sensibilidad para determinar el factor de seguridad frente al aumento del nivel freático. Se parte de la hipótesis que el nivel freático se encuentra a 85cm por debajo de la superficie y al modelo se le asigna dicho nivel freático como el mínimo. Cuando el nivel freático llega a saturar la ladera, a este se le asigna el máximo. En la Figura 74 se muestra esta representación.



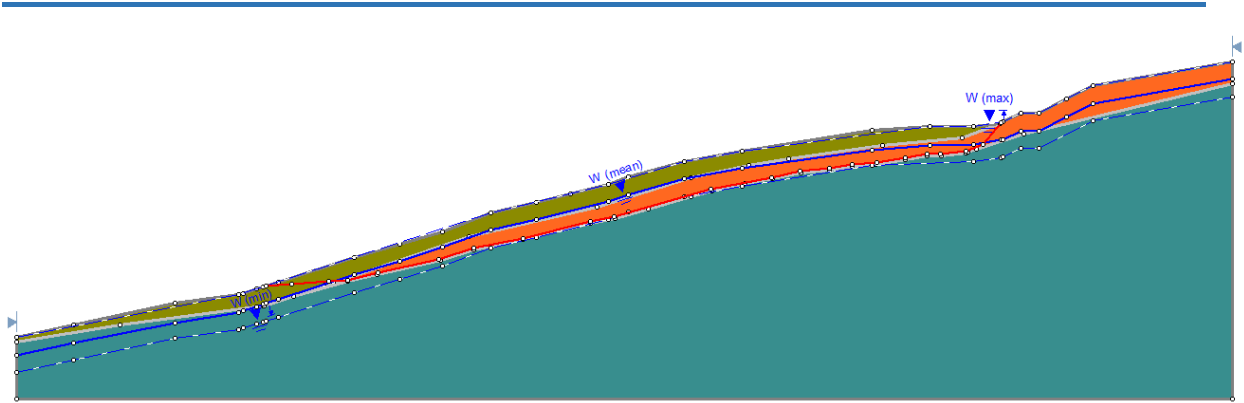


Figura 74. Distribución del nivel freático utilizando la media normalizada.

Para representar el cambio de presión de agua con relación a la altura del nivel freático se utiliza la media normalizada. La media normalizada es simplemente la elevación relativa del nivel freático medio a lo largo de cualquier línea vertical entre los límites máximos de la capa freática y mínimo (Rocscience). Por lo tanto, los valores del factor de seguridad con relación a la media normalizada son observados en la Figura 75.

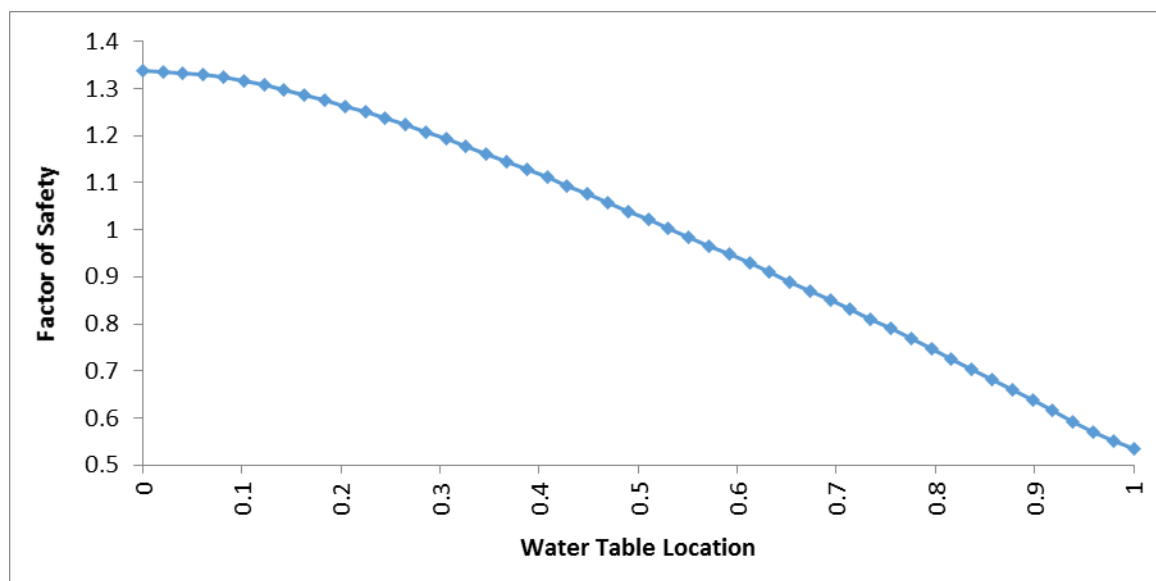


Figura 75. Relación entre el factor de seguridad y el nivel freático.

Se interpreta de la figura anterior que a medida que el nivel freático satura las argilitas alteradas, el factor de seguridad tiende a decaer bruscamente. Para que el talud se encuentre al límite de la estabilidad ( $FS=1$ ), la media normalizada debe ser de 0.53.

Si se quisiera saber a qué profundidad de la superficie el nivel freático debe estar para que la falla ocurra, los cálculos fueran los siguientes:

$$0.5337 * 85 \text{ cm} = 45.365 \text{ cm}$$

$$85 \text{ cm} - 45.365 \text{ cm} = \mathbf{39.63 \text{ cm}} \rightarrow \text{por debajo de la superficie}$$

Se concluye que en base al modelo, el piezómetro debe oscilar cerca de 4.53 kPa para que el talud pueda fallar.

## 8. Conclusión

En esta sección se describirán las conclusiones a las que se llegó en la presente investigación. Para la misma, se utiliza la pluviometría registrada por la estación meteorológica “METEO” correspondiente al año 2015 y la respuesta que se obtuvo por parte de los sensores de monitoreo (potencial hídrico, contenido de agua, piezómetro y extensómetro). Se evaluará el comportamiento que tuvo el suelo con relación a las lecturas observadas en las instrumentaciones y un análisis de estabilidad, utilizando las propiedades mecánicas presentes del suelo, establecerá si presenta algún riesgo.

Los resultados del pluviómetro revelan que el año 2015 fue mayormente seco. No obstante, se registraron valores significativos en la intensidad de la lluvia que sirvieron para demostrar la rápida respuesta ante la infiltración del coluvión. La arcilla altamente fracturada que compone al coluvión presenta diferentes características geotécnicas al variar su profundidad. El suelo que engloba la parte superior del coluvión presenta mayores valores de succión que el encontrado cerca a las argilitas alteradas. Los cambios en la succión que se observan para ambos sensores son mayormente relacionados a lluvias intensas de larga duración.

Se elaboró una curva característica para relacionar la succión del suelo y el contenido de agua. Como resultado se obtuvo que el contenido de agua al momento del secado presenta valores superiores que al momento de humectación, presentándose la histéresis.

Se analizaron los posibles asensos del nivel freático, utilizando un piezometro y se observó que no hubo ninguna presión positiva en sus registros. Al contrario, debido a que el piezómetro de cuerda vibrante es capaz de medir succión, se observaron oscilaciones de presiones negativas durante todo el año. Esto implica que la respuesta observada en el coluvión es muy distinta a las de las argilitas alteradas. Por otro lado, las lecturas obtenidas del extensómetro comprueban que el terreno no presentó ninguna actividad significativa.

Se hicieron comparaciones entre los diez episodios con mayor intensidad de lluvia y su relación con las lecturas observadas en las instrumentaciones. Se pudieron observar las siguientes características:

### *a) Potencial hídrico:*

-Los cambios en la succión están mayormente relacionados a episodios de lluvia intensos de larga duración.

-El sensor más alejado de la superficie presenta mayores cambios en la succión cuando se observan precipitaciones con alta intensidad horaria en episodios de larga duración. Cuando se tienen episodios cortos de mucha intensidad, este sensor presenta pocos cambios.

### *b) Contenido de agua*

-El sensor más cercano a la superficie retiene mayor cantidad de agua que el sensor más alejado.

-El sensor más alejado de la superficie responde con mayor frecuencia a cambios en su contenido de agua cuando se observan lluvias intensas de larga duración. Estos cambios mayormente ocurren seguido de la máxima precipitación horaria de ese episodio.

### *c) Piezómetro*

-Aunque el piezómetro no experimentó presiones positivas, se analizaron sus mediciones para los días de mayor intensidad, tanto horaria como diaria y se observó un incremento leve. Esto quiere decir que el piezómetro si experimenta actividad, pero la precipitación registrada no provocó un aumento en el nivel freático que pudiera poner en riesgo la ladera. Por otro lado, al estar colocado por debajo de las argilitas alteradas, se nota que la alta permeabilidad del coluvión no puede relacionarse con la de las argilitas. Aunque exista un tiempo de respuesta rápido para la parte superior del deslizamiento, no implica una infiltración rápida que eleve el nivel freático.

Con el propósito de comprobar los resultados obtenidos por los sistemas de monitoreo, se hizo un análisis de estabilidad utilizando el perfil del talud. En este análisis, el nivel freático fue elevado hasta saturar los diferentes estratos que componen el talud. En el primer análisis, la ladera se satura hasta lograr que las presiones registradas por el piezómetro tengan cierta semejanza con las evaluadas por el modelo de estabilidad. De acuerdo con los resultados, la ladera presenta un factor de seguridad (FS)  $>1$ , comprobando las lecturas obtenidas por el extensómetro. Para que la ladera falle, el nivel freático debe aumentar lo suficiente para causar que las argilitas alteradas se saturen.

Las futuras investigaciones tendrán como parte de sus objetivos analizar con más detalle las argilitas alteradas. Estas presentan el mayor riesgo ante un movimiento de ladera de acuerdo al análisis de estabilidad desarrollado en esta investigación. Se recomienda la colocación sensores Decagon MPS-2 y Decagon 10HS dentro del estrato anterior y así poder analizar la permeabilidad del mismo. Por otro lado, el uso de más piezómetros podría dar un mejor entendimiento de las oscilaciones del nivel freático y servirían para tener mayor exactitud en los resultados de un análisis de estabilidad. Con estos se conocería la superficie freática y no se asumiría paralelo a la superficie. También se recomienda un análisis de la infiltración de la lluvia mediante modelos numéricos ya sea por elementos finitos o diferencias finitas. Esta anterior serviría para tener una mayor comprensión de las respuestas obtenidas por los sensores y la interacción que hay entre los diferentes estratos que componen la ladera de Cercs.

## 9. Referencias

- ADATEC, s.f. *Aparato de corte anular Bromhead*. [En línea]  
Available at: <http://www.adatec.co.cr/nuevo/route.php?url=aparatodecorteanularbromhead>
- Alonso, E., 2005. *Estabilidad de Taludes*. s.l.:UPC.
- Alvarado, L., 2011. Potencial Hidrico. Issue  
<https://misclasesfisiologiavegetal.files.wordpress.com/2011/04/potencial-hidrico.ppt>.
- Anon., s.f. *Instituto Cartografico de Catalunya*. [En línea]  
Available at: [www.icc.cat](http://www.icc.cat)
- Aryal, K. P., 2006. Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods. *Norwegian University of Science and Technology*, p. 146.
- Caine, N., 1980. The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Wiley*, pp. 23-27.
- Cedeño Ramirez, R. M., 2014. CARACTERIZACIÓN, AUSCULTACIÓN Y ESTUDIO DE UN DESLIZAMIENTO EN EL PRE-PIRINEO (POBLADO DE CERCS).. *UPC Tesinas*, p. 52.
- Copons Llorens, R. & Tallada Masquef, A., 2009. MOVIMIENTOS DE LADERA. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, p. 3.
- Decagon, s.f. *Decagon*. [En línea]  
Available at: [http://www.decagon.com/media/filer\\_public/a2/a0/a2a07935-23a3-429a-9ed5-fdb3529f6caa/mps-2.png](http://www.decagon.com/media/filer_public/a2/a0/a2a07935-23a3-429a-9ed5-fdb3529f6caa/mps-2.png)
- Diaz, J. S., 2012. *Deslizamientos*. [En línea]  
Available at: <http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/45-tomo-i.html>
- El-Keshky, M., Zapata, C., Kavazanjian, E. & Houston, S., 2011. Temperature Effect on the Soil Water Retention Characteristic. Issue 266075134, p. 102.
- Enciclopedia.cat, s.f. *Gran Enciclopedia Catalana*. [En línea]  
Available at: <http://www.enciclopedia.cat/EC-GEC-0017018.xml>
- Geosense, s.f. *Vibrating Wire Piezometers*. [En línea]  
Available at:  
[http://www.geosense.co.uk/media/Product/6/thumbnail/resized/w300\\_h300/3042035.jpg](http://www.geosense.co.uk/media/Product/6/thumbnail/resized/w300_h300/3042035.jpg)
- GmbH, A., 2016. [En línea]  
Available at: [http://www.asm-sensor.com/asm/pdf/pro/ws12\\_en.pdf](http://www.asm-sensor.com/asm/pdf/pro/ws12_en.pdf)
- González de Vallejo, L. I., Mercedes, F., Ortuño, L. & Otero, C., 2002. *INGENIERÍA GEOLÓGICA*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Google Maps, 2015. *GOOGLE*. [En línea]  
Available at: [maps.google.com](http://maps.google.com)
- Gostelow, T. P., 1991. Rainfall and Landslides.
- Gui-rong Zhang, Y.-j. Q. Z.-c. W. a. B. Z., 2014. Analysis of Rainfall Infiltration Law in Unsaturated Soil Slope. *The Scientific World Journal*, p. 2.





Weiczorek, G. F., 1987. *Effect of rainfall intensity and debris flow in central Santa Cruz Mountains, California*. [En línea]

Available at: <http://landslides.usgs.gov/docs/wieczorek/Binder1.pdf>

Williams JR, O. Y. C. J., 1998. Estimation of infiltration rate in vadose zone: application of selected mathematical models.. En: *Estimation of infiltration rate in vadose zone: application of selected mathematical models vol 2*. s.l.:United States Environmental Protection Agency , pp. EPA/600/R-97/128b.

Won Taek Oh, S. K. V., 2010. Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes. *Sciencedirect*, p. 2.

X.B. Tu, A. K. F. D. L. T. H. M., 2008. *Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure*, s.l.: Sciencedirect.