estabilidad de la masa de suelo, se afectó negativamente por el evento extremo de lluvia simulada.

El primer sector del talud en llegar a la saturación fue el del área de influencia del tensiómetro N° 2 (S2) (Figuras 31 y 34), que correspondió al pie del talud. Lo anterior puede tener influencia negativa en la estabilidad. La saturación más rápida del pie del talud fue encontrada igualmente por Tohari, Nishigaki y Komatsu (2007) al experimentar en suelos no cohesivos y suelos derivados de granito.

Por el contrario, el área superior del talud a pesar que sufrió reducción de la succión, escasamente repercutió en el grado de saturación en los puntos influenciados por los sensores S6, S7 y S8 durante las primeras 5 horas (Figura 31). Lo anterior concuerda con Rahardjo *et.al.* (2010) quienes basados en mediciones semejantes en campo encontraron que la succión no necesariamente se perdía después de un evento de lluvia intenso.

En las Figuras 34 y 35 se aprecia, como después de 18 horas con 450 mm de lluvia acumulada se llegó a la saturación del talud. El horizonte A en su parte media y baja de la ladera fue el primero en saturarse con la lluvia y por último se saturó el sector de la corona (S8 y S7) respectivamente. El horizonte B a pesar de iniciar en una condición cercana a la saturación no mostró una reacción tan rápida a la lluvia en cuanto a la saturación como el horizonte A.

Durante el período de reposo después de la lluvia, en términos generales se presentaron incrementos en la presión intersticial positiva, en especial en el subsuelo (S6 y S3) y el pie del talud (S1) (Figura 35) que se podría corresponder al drenaje del talud en dirección horizontal y vertical. Rahardjo *et. al.* (2010), encontraron similares resultados en sus experimentos de campo al demostrar que, después de que la lluvia paró, el grado de saturación en la parte alta del talud decreció y el mismo en las partes bajas continuó su incremento. Es decir que al momento de terminar la lluvia el proceso de infiltración y reducción de la succión continúan.

Los movimientos en masa causados por la lluvia sobre el modelo físico, se podrían clasificar como desgarres someros en el horizonte A (Figura 32). Se observó como la erosión superficial predominó y se formaron micro pedestales de 1 a 2 cm de longitud (Figura 33), lo cual desencadenó desgarres someros. Lo anterior coincide con lo reportado por Hoyos (2006) quien propone la hipótesis de que el mayor aporte de la lluvia es la escorrentía y con ello la erosión y la aparición de desgarres someros. La lluvia especialmente en suelos residuales de baja permeabilidad poco contribuye a la saturación inmediata del subsuelo y por ende ésta no sería la responsable directa de deslizamientos profundos o rotacionales. Según el mismo autor, es poco plausible que la infiltración local de la precipitación genere incrementos en el nivel piezométrico y en la presión neutra en el suelo, de la magnitud necesaria para desencadenar un deslizamiento profundo y menos que éste se presente en un término relativamente corto de tiempo después de ocurrida la precipitación.

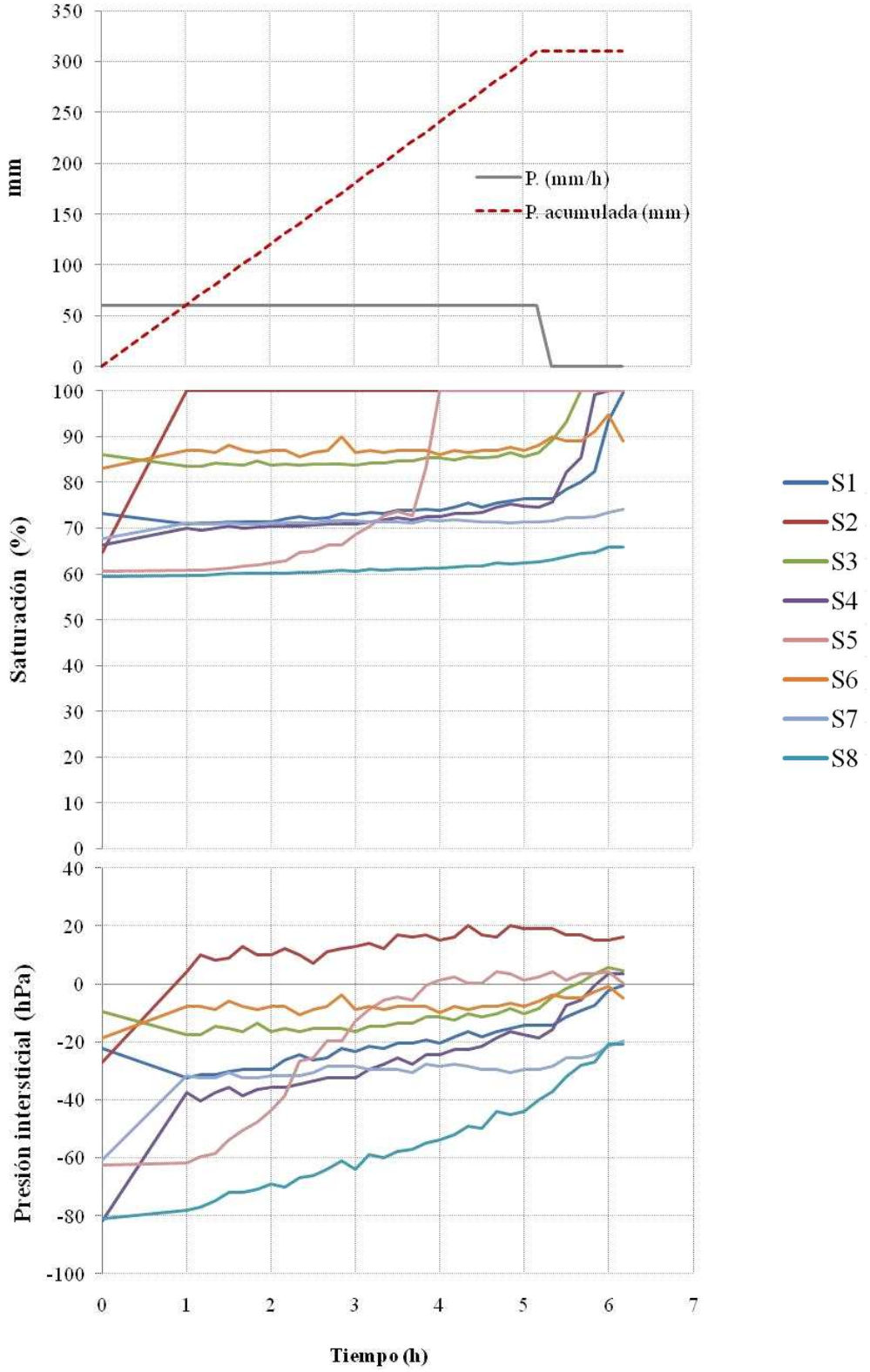
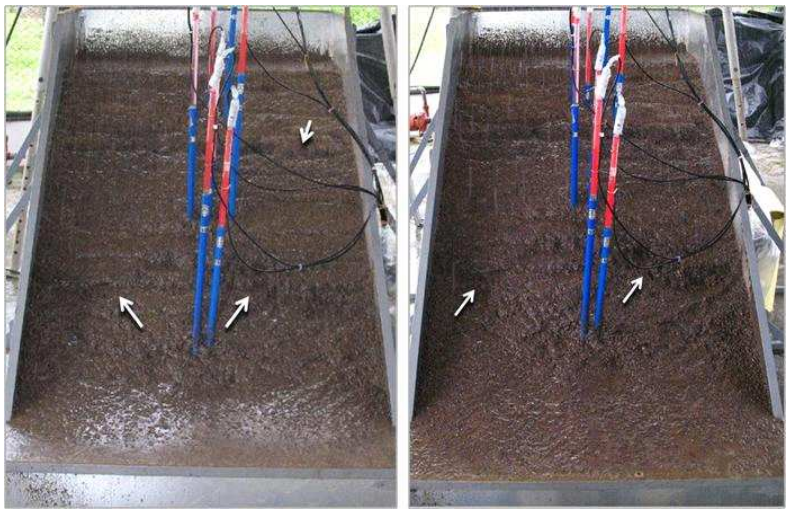


Figura 31. Comportamiento de la succión y humedad. Lluvia simulada. Caso N° 1



a **b**

Figura 32. Desgarres someros y saturación evidente de la base del talud. Caso N° 1. a) 2 h de iniciada la lluvia. b) 5 h de iniciada la lluvia

Figura 33. Signos de erosión - micro pedestales de 1 a 2 cm de longitud. Caso N° 1

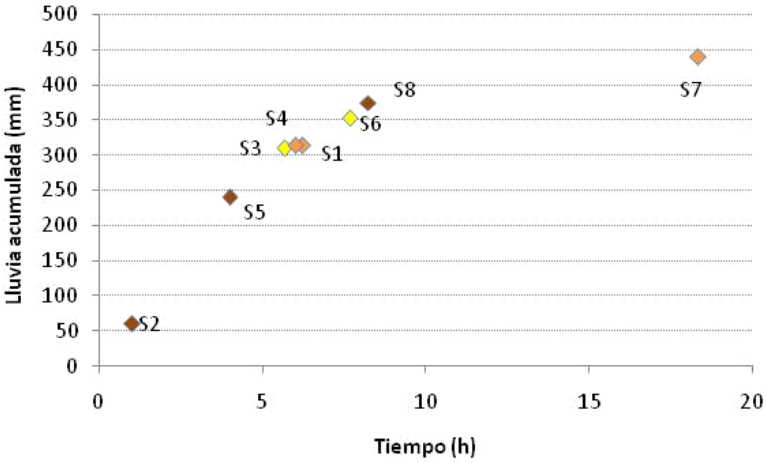


Figura 34. Tiempo y lluvia acumulada para alcanzar la saturación. Caso N°1

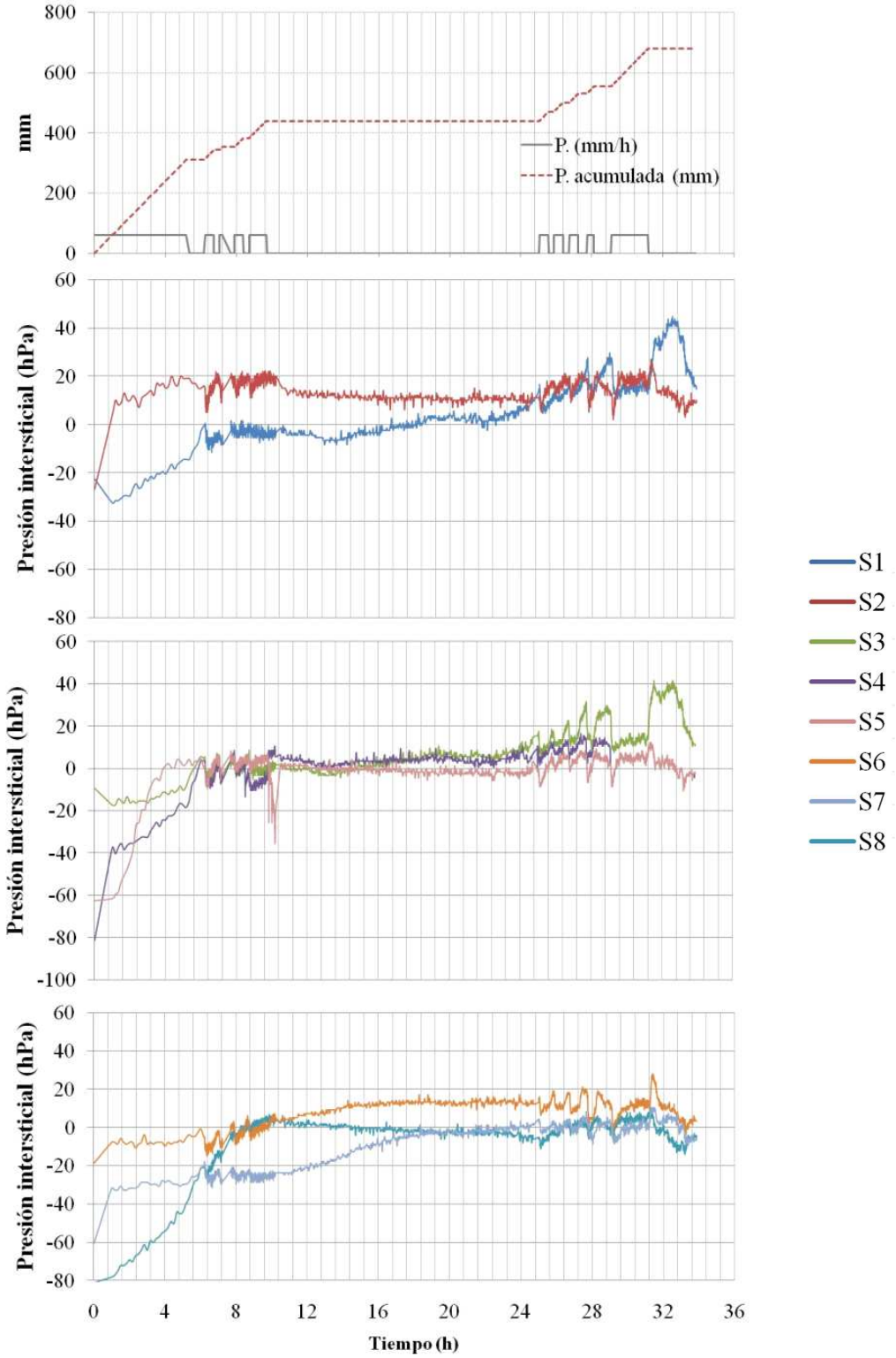


Figura 35. Comportamiento de la succión y humedad. Lluvia simulada. Caso N° 1

6.2.1.2 Comportamiento de la succión y humedad con lluvia simulada en suelo de la Unidad San Simón, *Typic eutropepts*. Caso N°2.

Al igual que en el Caso N°1, se observó una tendencia decreciente de la succión con la cantidad de lluvia acumulada. La succión presentó un componente estacional determinado por el inicio de la lluvia simulada. La amplitud de las oscilaciones dependió del tiempo de reposo y el inicio de la lluvia (Figuras 36 y 37).

Poco después del inicio de la infiltración por la lluvia, la succión se incrementó, seguido por una caída por debajo del valor inicial al finalizar la lluvia (Figuras 36 y 37). La explicación probable para esto es el aumento de la presión de aire con el inicio de la infiltración. El anterior fenómeno fue encontrado por Wang, Feyen y van Genuchten (1997) quienes reportaron para suelos no saturados que la compresión del aire delante del frente de humedecimiento es una causa de la inestabilidad que se presenta al momento de la infiltración.

En este sentido, la infiltración de agua lluvia en el suelo podría causar la renovación del aire del suelo de dos modos: el desplazamiento del aire de los poros por el agua que después es sustituida por aire y el acarreo de oxígeno disuelto en el agua. En muchos casos cierta cantidad de aire queda atrapada, cuya salida no pudo ser forzada por la infiltración (Baver, Wilford y Gardner, 1973)

Hu, Chen y Zhou (2011) analizan experimental y numéricamente el efecto de la infiltración generada por la lluvia, la cual permite la propagación del frente de humedecimiento y con él, el transporte de aire y la deformación del suelo. Los autores explican que físicamente conforme avanza el frente de humedecimiento se propaga el aire de los poros de la zona insaturada y se genera un equilibrio límite entre las fases líquida y gaseosa. A su vez, el transporte de gas en los poros tiene un efecto en retardar el flujo de agua en el suelo por la reducción de la permeabilidad y sumado al aumento del contenido de agua las propiedades mecánicas comienzan a deteriorarse, se genera la deformación del talud y la pérdida de estabilidad.

Las lluvias intensas y frecuentes que acumularon cerca de 140 mm en las primeras 6 horas tan solo causaron la saturación del pie del talud (S2 y S3) por leves momentos y no así la de los sectores medio (S4 y S5) y alto del talud (S6, S7 y S8). En las Figuras 37 y 38 se aprecia, como después de 70 horas con 400 mm de lluvia acumulada se llegó a la saturación total del talud. El horizonte B en la parte baja de ladera (S3) seguido por el pie de la ladera (S2) y (S1) respectivamente fueron las áreas que primero se saturaron (Figura 38). El patrón de lluvia de menor cantidad (que el caso N°1) tuvo la capacidad de penetrar a estratos más profundos. El horizonte B (subsuelo) se saturó con 150 mm de lluvia acumulada mientras que con el patrón de lluvia alto Caso N° 1 requirió de 300 mm al partir de condiciones de humedad similares. La presión intersticial positiva aumentó en el pie del talud (S1 y S3) en los períodos de reposo de la lluvia (Figura 37).

Se presentaron desgarres superficiales en el horizonte A (Figura 39) y un movimiento en la corona en el horizonte AB (Figura 40a). Además de grietas de tensión horizontales y verticales en el horizonte A producto de los procesos de humedecimiento y drenaje. En la Figura 40b, se aprecian signos de la saturación del horizonte B que comenzó a fluir internamente hacia el horizonte AB.

La precipitación en las laderas de las montañas fluye en su mayor parte como escorrentía, y sólo una fracción menor de ella llega a la zona de saturación. Según Hoyos (2006) la componente de escorrentía de la precipitación actúa principalmente como agente de erosión superficial. Su efecto en los procesos de degradación en masa está asociado al arrastre de materiales de los escombros de deslizamientos someros por el agua de escorrentía superficial y a la socavación de las orillas por las corrientes de agua durante las crecientes. En laderas de alta pendiente, desarrolladas sobre suelos cohesivos, de baja permeabilidad, la magnitud de la infiltración a partir del horizonte de suelo orgánico es muy reducida y, consecuentemente, es baja la incidencia de la precipitación local en el desencadenamiento de deslizamientos profundos.

La duración de la lluvia presenta gran influencia en el avance del frente de humedecimiento, la profundidad del frente de humedecimiento durante la infiltración de la lluvia es proporcional a la permeabilidad en medio saturado (Green y Ampt, 1911).

Igualmente en modelos físicos en un suelo con dos capas, si la intensidad de lluvia era alta se causaban movimientos someros del primer horizonte, si la precipitación era menor la profundidad de la falla se hacía mayor (Sharma y Nakagawa, 2010).

Mortrasio y Valentino (2007) al estudiar deslizamientos superficiales de suelos de origen volcánico en modelos experimentales encontraron igualmente que las capas superficiales alcanzaron primero la saturación (succión matricial igual a cero) antes que las capas más profundas, la falla del talud ocurrió después de la saturación completa del suelo en contacto con una capa impermeable.

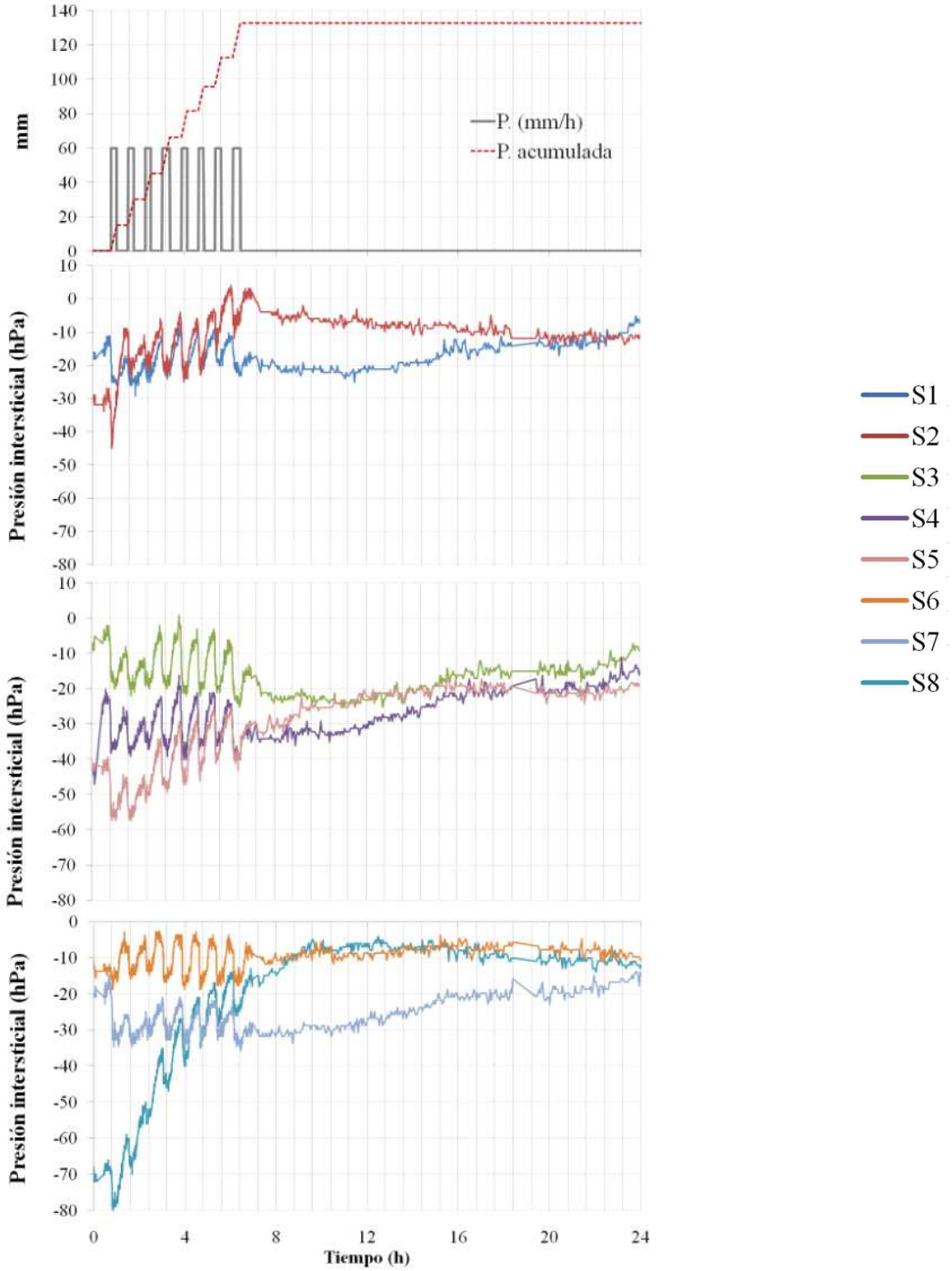


Figura 36. Comportamiento de la succión y humedad saturada estimada. Lluvia simulada Caso N° 2

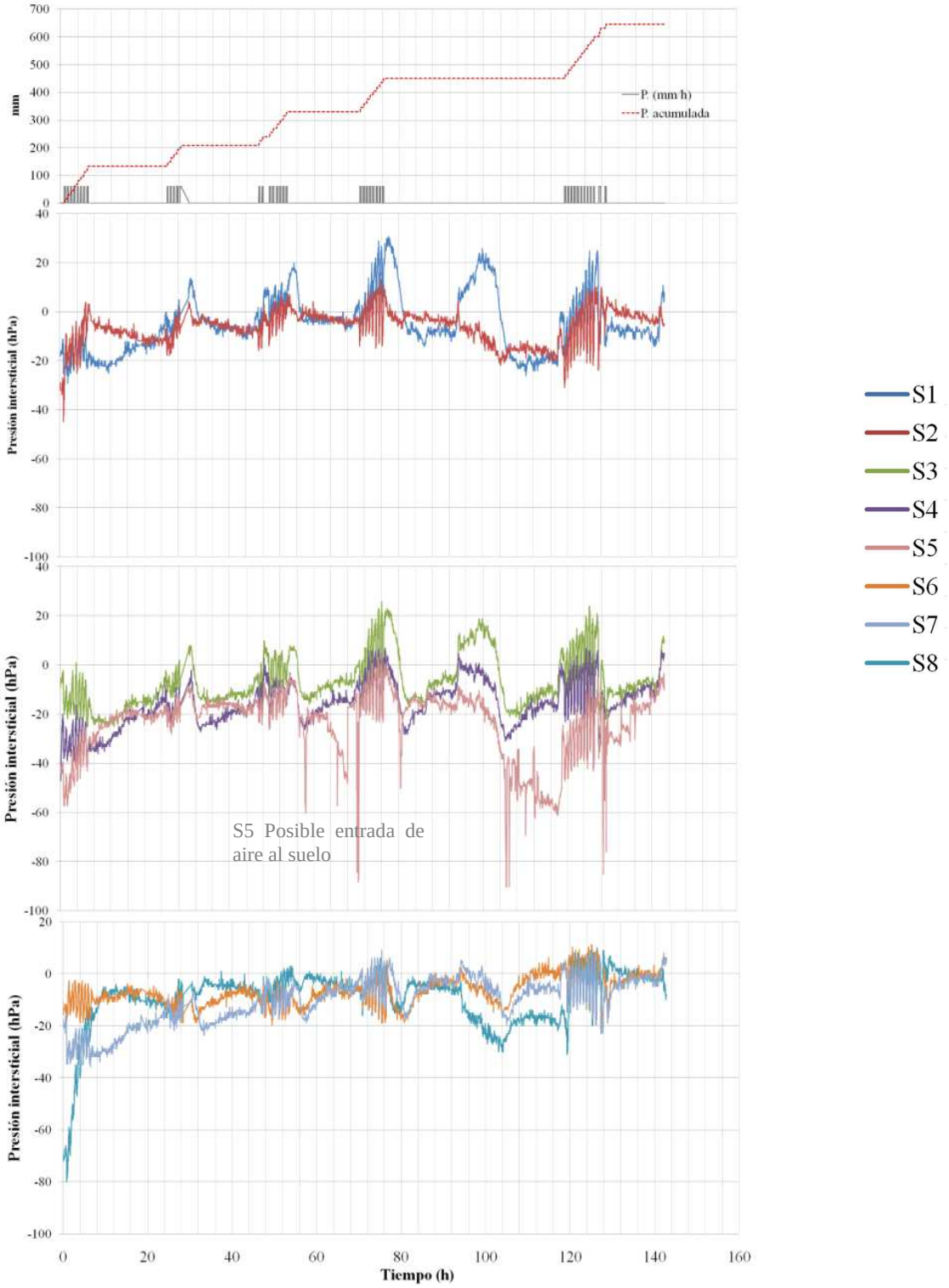


Figura 37. Comportamiento de la succión y humedad. Lluvia simulada. Caso N° 2

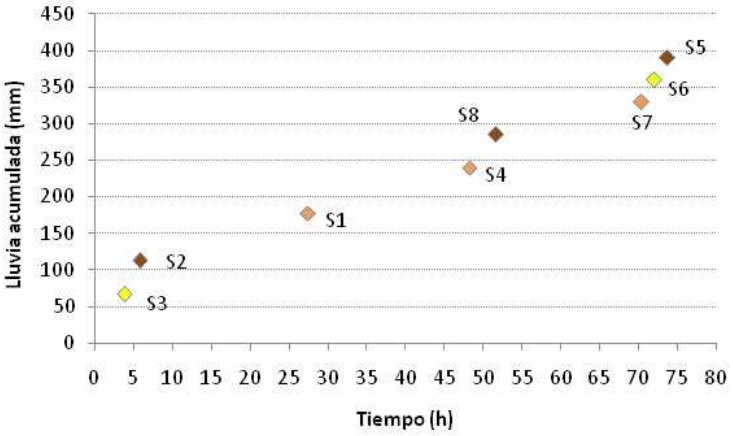


Figura 38. Tiempo y lluvia acumulada para alcanzar la saturación. Caso N°2

Figura 39. Desgarres someros. Caso N°2

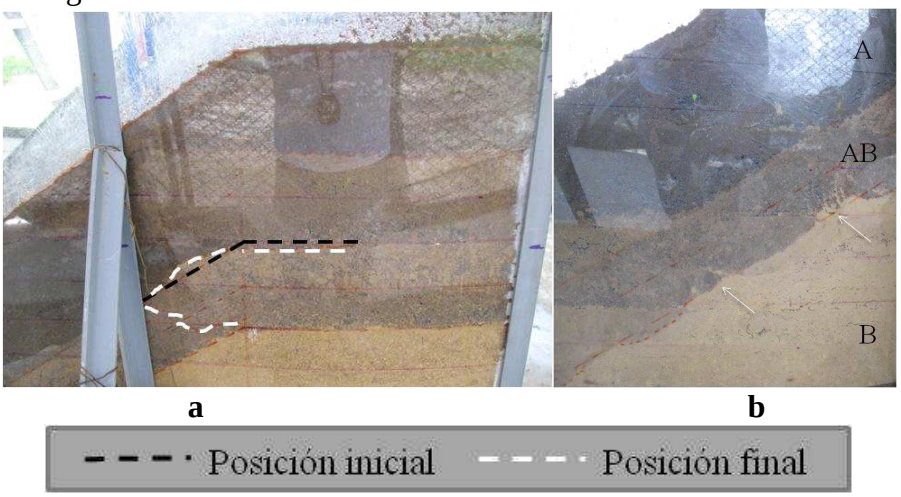


Figura 40. Fallas en el talud. Caso N° 2. a) Movimiento en la corona del talud. b) Signos de saturación del horizonte B que fluye hacia el horizonte AB.

6.2.1.3 Comportamiento de la succión y humedad con lluvia simulada en suelo de la Unidad San Simón, *Typic eutropepts*. Caso N° 3.

Contrario a los resultados obtenidos en los casos N°1 y N° 2, se presentó la pérdida rápida de succión en el área superior del talud correspondiente al horizonte A (S8) (Figuras 41 y 42). Lo anterior probablemente debido a la mayor presencia de grietas someras en este sector del talud y al estado inicial de humedad al momento del inicio de la lluvia (Figura 43). El agrietamiento de suelos debido a los procesos de secado y humedecimiento es un factor que puede tener implicaciones negativas en la estabilidad ya que a través de estas zonas de debilidad se infiltra el agua y se incrementa más rápidamente la presión hidrostática; estas grietas se convierten en zonas de debilidad al desintegrar la masa de suelo con lo cual se reduce la resistencia al corte (Zhan, 2007).

El estado inicial del humedad del suelo o succión también puede afectar la velocidad de saturación del suelo con se ha encontrado en varios modelos físicos (Lee, Kassim y Gofar, 2011). En los periodos prolongados de sequía y con mayor atención en la transición entre los fenómenos El Niño a La Niña se debe mantener el suelo con coberturas vivas y/o muertas para disminuir la erosión por las aguas de escorrentía y la presencia de grietas de tensión superficiales que pueden tener implicaciones en la estabilidad del suelo.

Similar comportamiento obtuvieron Lee, Kassim y Gofar (2011) al encontrar en modelos físicos a fines, que en suelos con partículas finas sujetos a procesos de secado y humedecimiento, la infiltración ya no es gobernada por la permeabilidad del suelo sino por el flujo preferencial desarrollado por el agrietamiento del suelo.

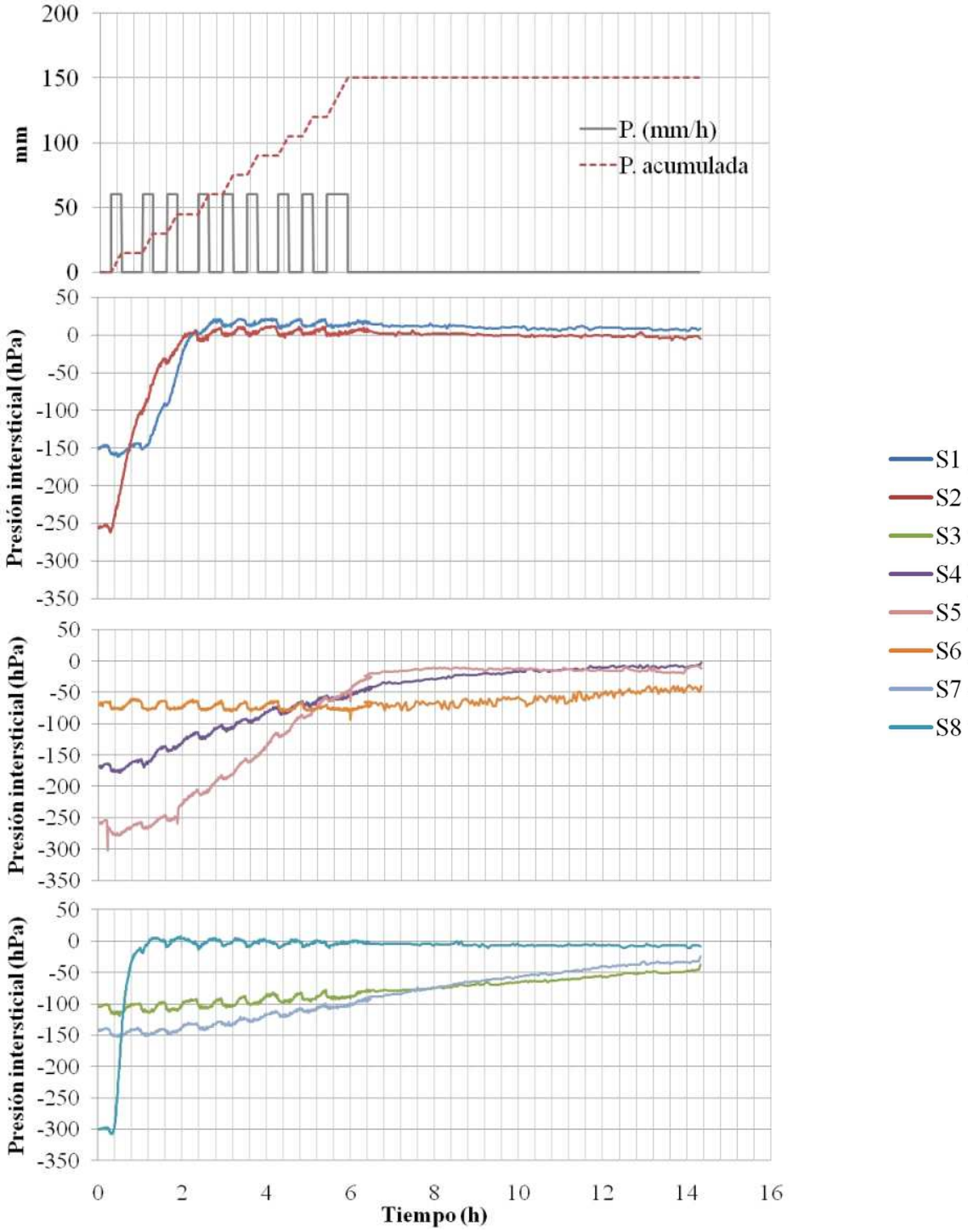


Figura 41. Lluvia simulada sobre talud seco y con grietas someras o superficiales. Caso N°3

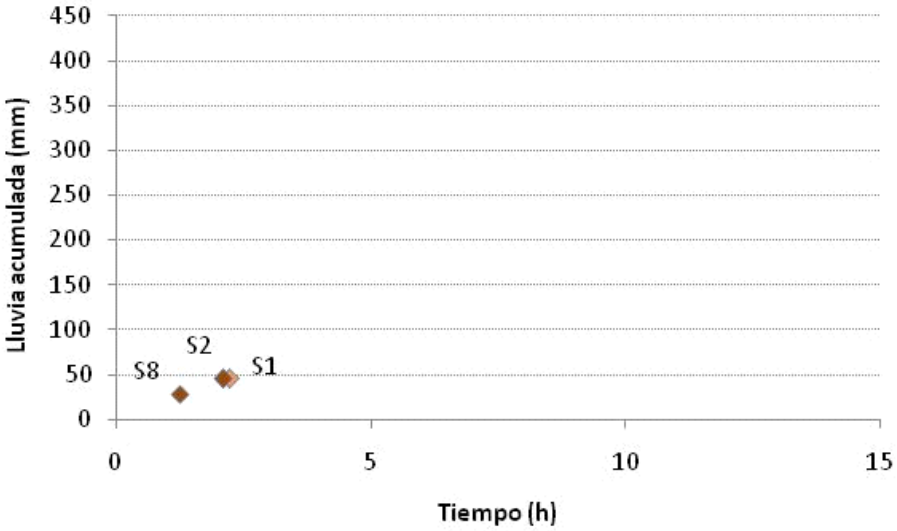


Figura 42. Tiempo y lluvia acumulada para alcanzar la saturación. Caso N°3

a **b**

Figura 43. Grietas de tensión al inicio (a) y final del experimento (b). Caso N° 3

6.2.2 Resultados método de agua en la espalda del talud

6.2.2.1 Comportamiento de la succión y humedad con simulación de agua en la espalda del talud en un suelo de la Unidad San Simón, *Typic eutropepts*. Caso 4.

Contrario a lo obtenido en los ensayos con lluvia simulada, en este caso, el sector del pie del talud fue último que se afectó por la pérdida de succión (S1 y S2). El horizonte B representado por los sensores S6 y S3 fue el primero en llegar al punto de saturación. Seguido por el horizonte AB representado por los sensores S4 y S7. El horizonte A representado por los sensores S2, S5 y S8 se saturó más lentamente (Figura 44).

El primer signo de inestabilidad observado fue el movimiento vertical (asentamiento) de la corona del talud con el incremento del nivel de agua (Figura 45), lo cual se podría atribuir al colapso del suelo debido al humedecimiento y posiblemente debido a la salida del aire previamente atrapado en la construcción del talud, signo igualmente encontrado por Jia *et al*. (2009) en suelos areno limosos mediante modelos físicos a fines.

Con el comienzo de la pérdida de succión en la parte baja del talud (S1 y S2) entre las 6 y 8 horas, inició el proceso de falla en el pie del mismo (Figura 46). El proceso se podría clasificar como un movimiento tipo cuña con potencial de retrogresión. Según Hoyos (1990; 2006), la reptación, los desgarres y deslizamientos someros, y algunos deslizamientos en cuña, están asociados frecuentemente a eventos locales de precipitación y a la infiltración y circulación del agua en la parte más superficial del terreno. Por otra parte se cuenta con evidencias isotópicas de la existencia de flujos subterráneos profundos de agua infiltrada desde altiplanos vecinos que tienden a ocasionar deslizamientos de gran magnitud en la base de las laderas para el caso del Valle del Aburrá en Antioquia (Hoyos, 1990). Lo cual podría haberse representado en el modelo físico, donde el sitio de falla (pie del talud) estaba relativamente distante del sito de infiltración (corona del talud).

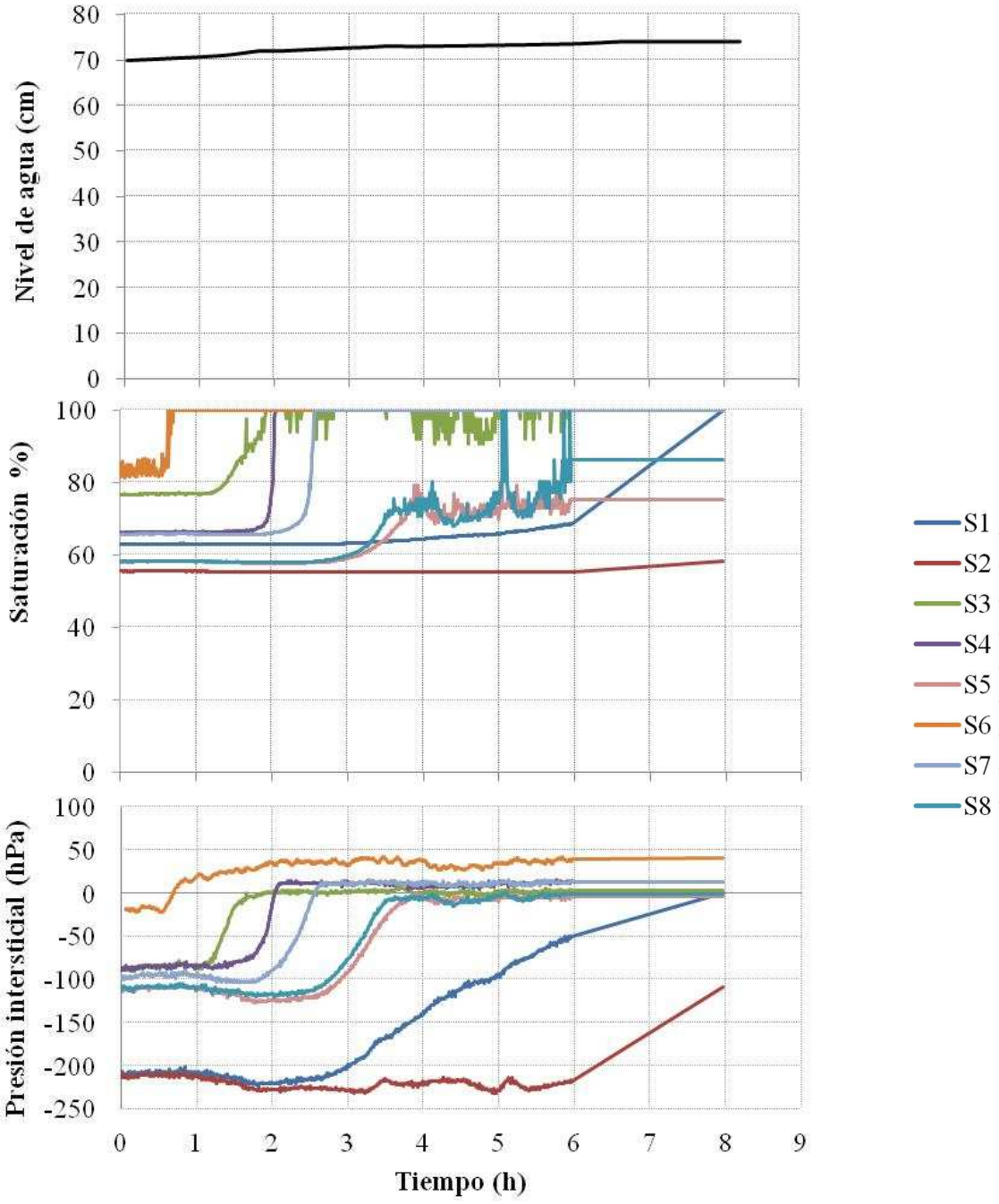


Figura 44. Comportamiento de la succión y humedad. Experimento **4**

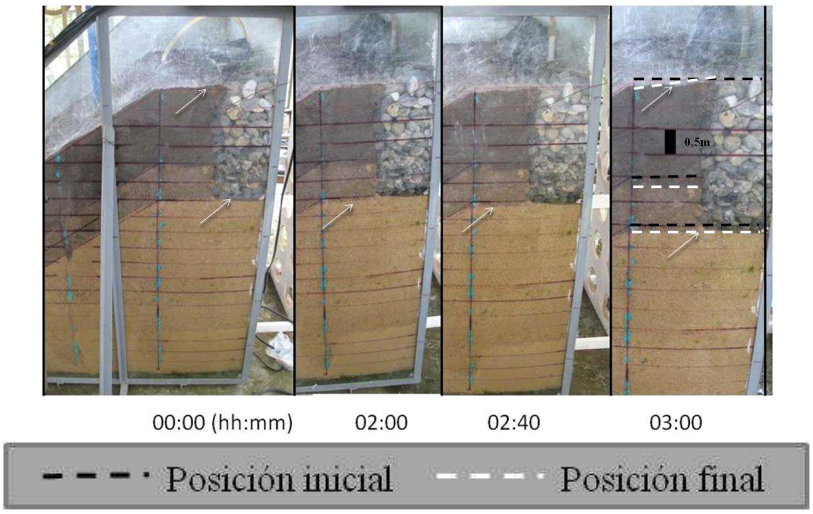


Figura 45. Asentamiento en la corona del talud. Caso N°4. Secuencia fotográfica

a) 00:00 hh:mm b) 06:00 hh:mm c) 08:00 hh:mm

Figura 46. Falla en la base del talud. Caso N°4. a) Estado inicial. b) Falla en la base 1, c) Falla en la base 2. Se aprecian micro grietas de tensión horizontales a lo largo de la superficie del horizonte A (b y c).

6.2.2.2 Comportamiento de la succión y humedad con simulación de agua en la espalda del talud en un suelo de la Unidad San Simón, *Typic eutropepts*. Caso N°5

Después de haberse saturado el talud y presentar las fallas someras en la base del mismo, se simuló un incremento rápido en del nivel freático, lo cual provocó el aumento de la presión intersticial positiva (Figura 47) y el movimiento en masa de magnitud mayor obtenido en el trabajo de investigación (Figuras 48 y 49). Se observó como el horizonte A se deslizó sobre el horizonte AB formando una superficie de falla relativamente plana. El horizonte AB también sufrió movimiento en masa aunque en menor proporción que el ocurrido en

horizonte A, en tanto que el horizonte B sufrió un desplazamiento leve en los primeros centímetros que limitaban con el horizonte AB

Las variaciones en la permeabilidad entre los tres horizontes podrían haber influenciado el plano de falla. Experimentos en modelos físicos han revelado que los tipos de falla dependen de la disposición de las capas de suelo mientras que la distribución de la presión intersticial dentro de las dos capas se influenció por la dirección de la infiltración (Lourenco, Sassa y Fukuoka, 2006).

Jia *et al*. (2009) consideran un problema de importancia el gran número de fallas que se observan durante la fluctuación rápida del nivel de agua en las laderas. En este sentido Germer y Braun (2011) la posición del nivel freático y en especial la variación abrupta de la presión intersticial tienen gran influencia en las condiciones de estabilidad de una ladera. Los mismos autores sugieren que el monitoreo de la presión intersticial es un indicativo importante de la estabilidad.

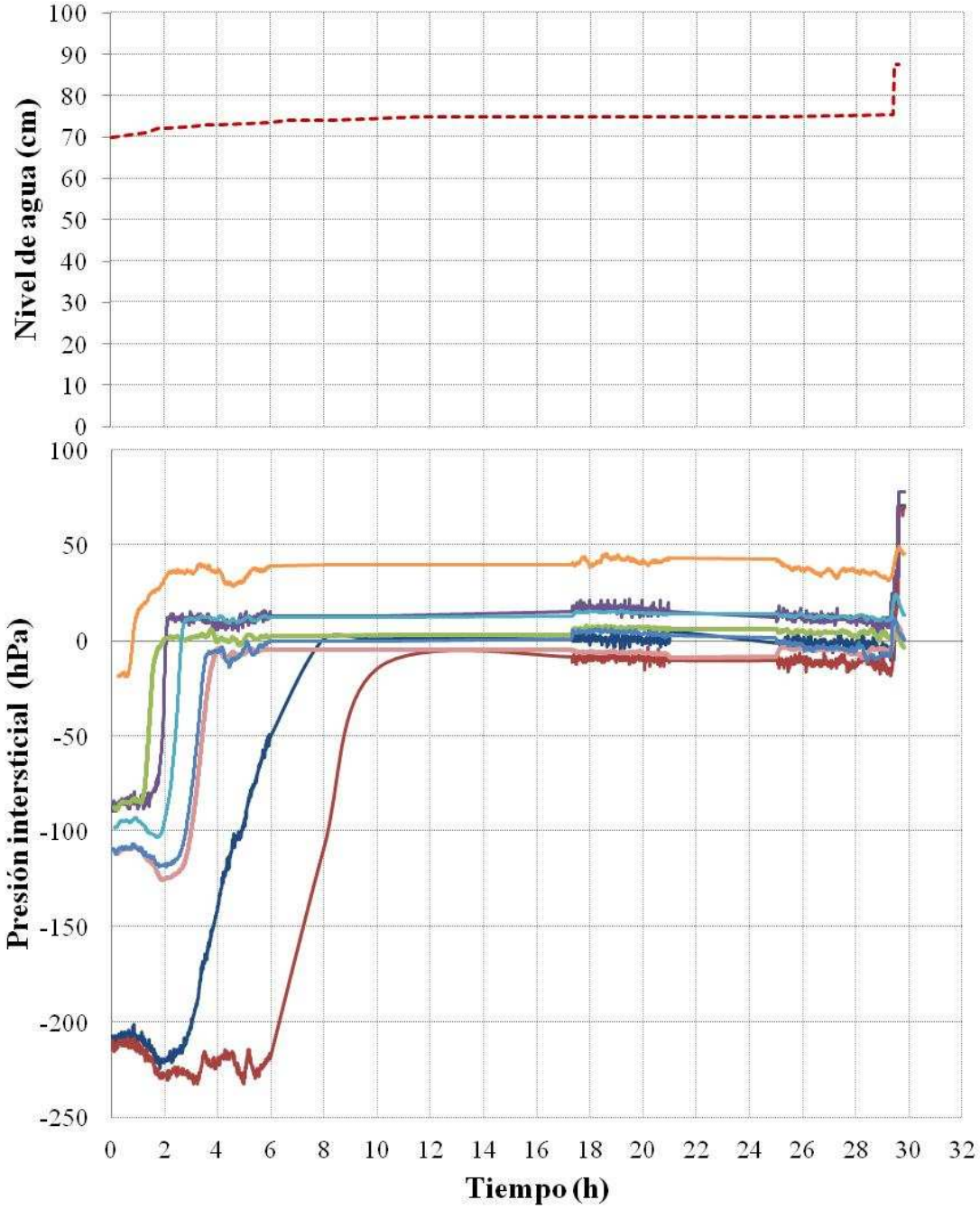


Figura 47. Comportamiento de la succión. Caso N° 5

00:00 hh:mm (29:30 hh:mm) (29:30 hh:mm)

Figura 48. Movimiento en masa superficial. Caso N° 5

Figura 49. Movimiento en masa superficial. Caso N° 5 (29:15 hh:mm)

6.2.2.3 Comportamiento de la succión y humedad con simulación de agua en la espalda del talud en un suelos de la Unidad San Simón, *Typic eutropepts.* Caso N° 6.

El aumento rápido del nivel freático en la espalda del talud, a los 10 minutos del inicio del experimento causó el movimiento en masa vertical (asentamiento) de la corona del talud (Figura 50) y a los 14 minutos grietas de tensión en el pie del mismo que desencadenó en un movimiento horizontal de la base del talud a las 6 y 8 horas después del inicio del flujo (Figura 51 y 52). Lo anterior se atribuye a la pérdida rápida de succión y posterior saturación de la corona del talud (S6 y S7) (Figura 53). Los cambios en la presión negativa de agua en los poros, puede resultar en cambios adversos no solo en la resistencia al corte sino en cambios de volumen (Fredlund, 2006).

(00:10 hh:mm)

Figura 50. Grieta de tensión en la parte media y asentamiento en la corona del talud. Caso N° 6

00:14 (hh:mm) **02:20 (hh:mm)**

Figura 51. Movimiento en masa en la base del talud. Caso N° 6. Secuencia.

(00:00 hh:mm) **(02:25 hh:mm)** **(02:32 hh:mm)**

Figura 52. Movimiento en masa en la base del talud. Caso N° 6. Secuencia

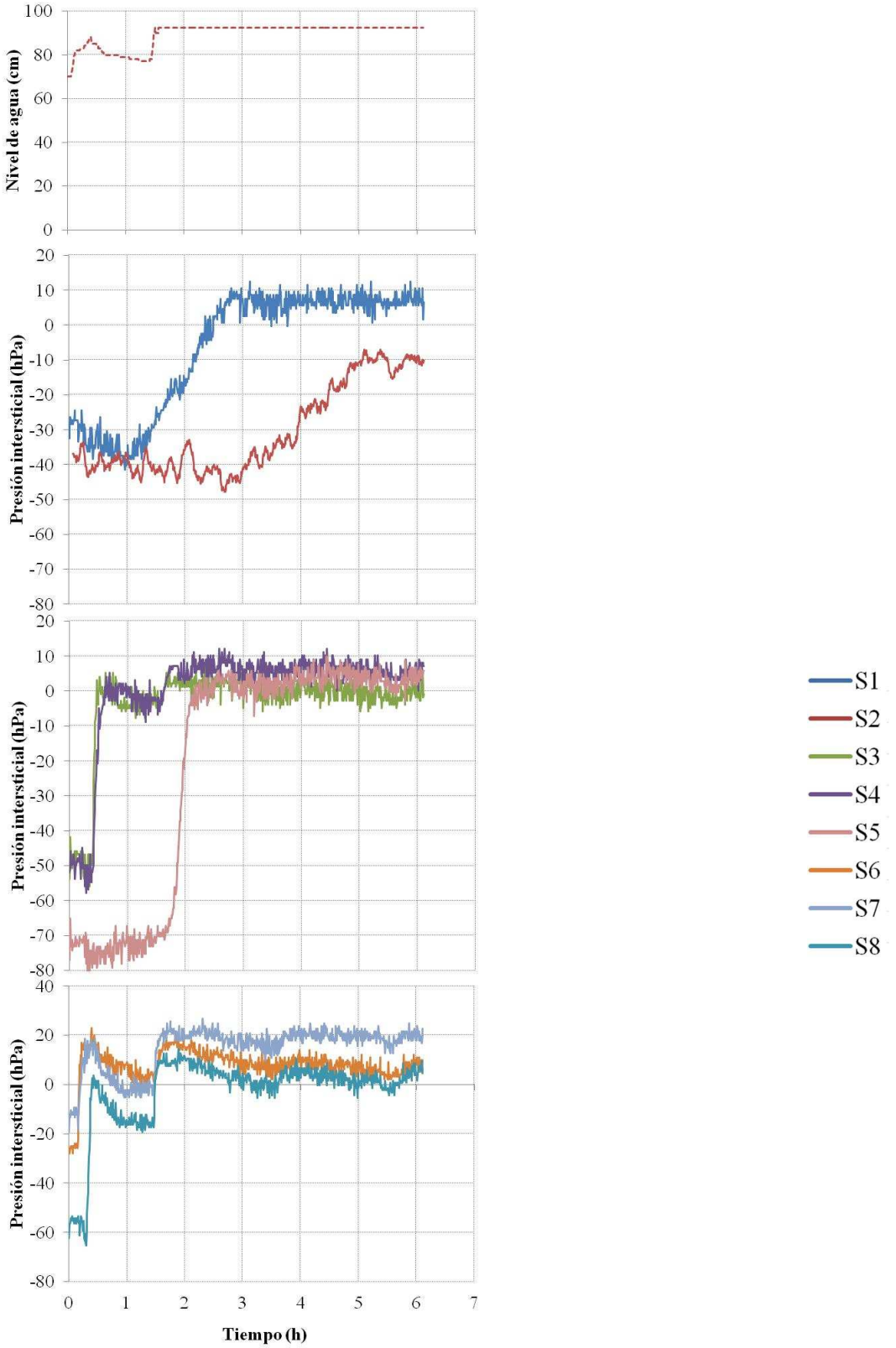


Figura 53. Comportamiento de la succión. Caso N° 6

6.2.2.4 Comportamiento de la succión y humedad con simulación de agua en la espalda del talud y lluvia simulada en un suelo de la Unidad San Simón, *Typic eutropepts* Caso N° 7.

Una vez saturados todos los puntos de influencia de los tensiómetros, se mantuvo el mismo nivel freático de 92,5 cm y se procedió a simular una lluvia de 100 mm/h durante una hora. Esta lluvia causó las mismas oscilaciones en la succión observadas en los Casos N° 1, 2 y 3 esta vez solo en los tensiómetros S2 y S5, el hecho de no haberse presentado este comportamiento en los demás puntos podría atribuirse a la saturación avanzada de los mismos y la ausencia de presión de burbujeo (Figura 54). Se infiere el aumento de la presión de aire en el suelo en los puntos S2 y S5 por el efecto de la infiltración de la lluvia según lo reportado encontrado por Wang, Feyen y van Genuchten (1997).

En este Caso se acentuó el movimiento en masa vertical del horizonte A sobre el AB y en comparación al Caso N° 6 y se presentó un movimiento en masa plano y regresivo en la base del talud, que comenzó a los dos minutos del inicio de la lluvia y continuó avanzando hacia la corona en forma de caída de bloques en forma de cuña y flujos de lodo. Al culminar la simulación de lluvia se observaron pequeñas grietas horizontales de tensión en el horizonte A (Figuras 55, 56 y 57).

En este Caso se concluye que una vez saturado el talud, una lluvia de alta intensidad de 3,3 mm en 2 minutos pudo desencadenar desgarres superficiales retrogresivos, cuñas y flujo de lodo, que en escala real podrían ser catastróficos. Este tipo de flujos han causado catástrofes en el municipio de Ibagué – Tolima (Beltrán, Castiblanco y Alfaro, 2006).

Este resultado está de acuerdo con lo encontrado por Mortrasio y Valentino (2007) en modelos experimentales en un suelo de origen piroclástico donde se encontró que el inicio de la falla se presentó un poco después de alcanzarse la saturación total del talud.

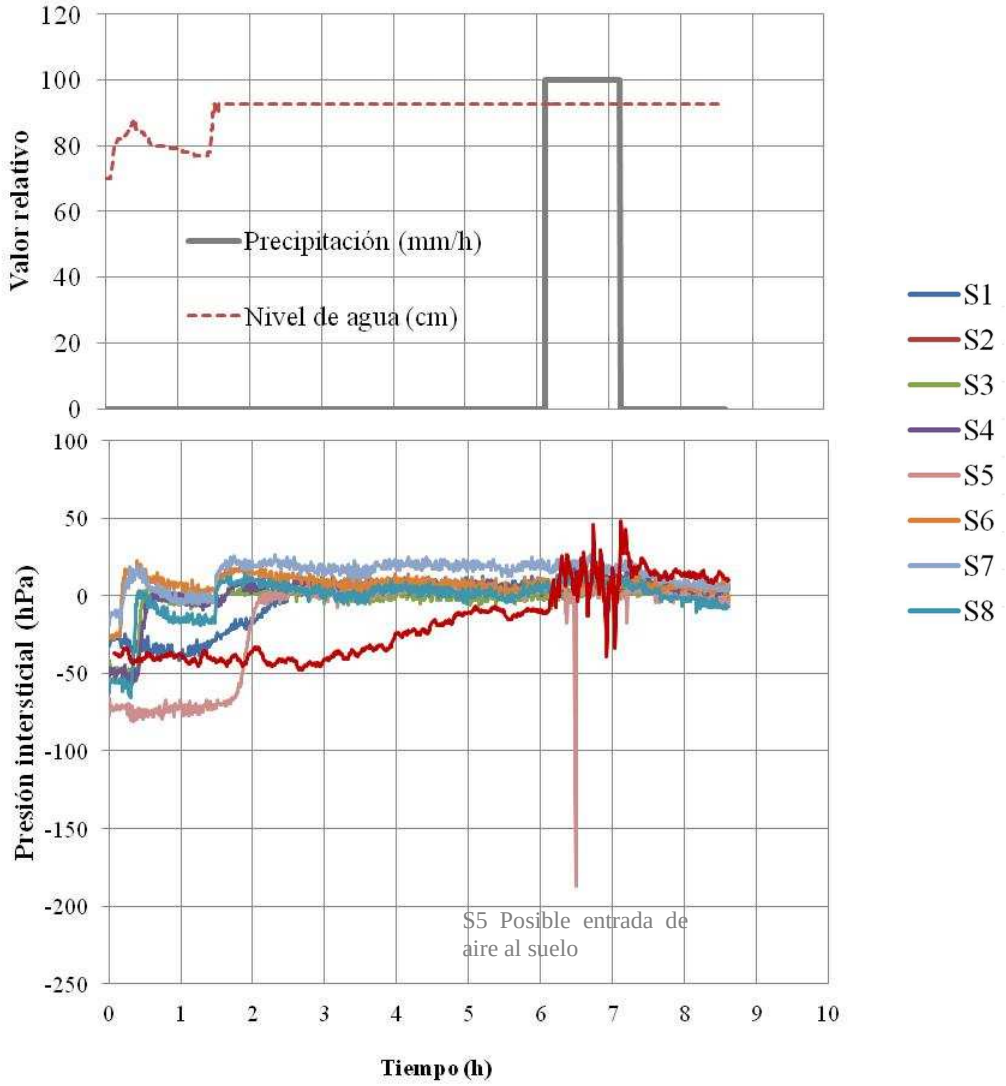
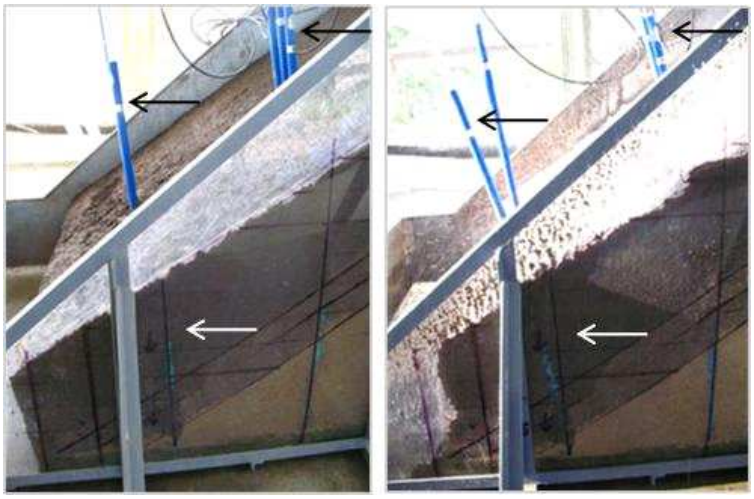


Figura 54. Comportamiento de la succión. Caso N° 7



a **b**

Figura 55. Movimiento en masa en la base del talud. Caso N° 7. a) Posición inicial. b) posición final.

a **b**

Figura 56. Movimiento en masa en la base del talud y grietas de tensión superficiales en el horizonte A. Caso N° 7. a) Estado inicial. b) Estado final.

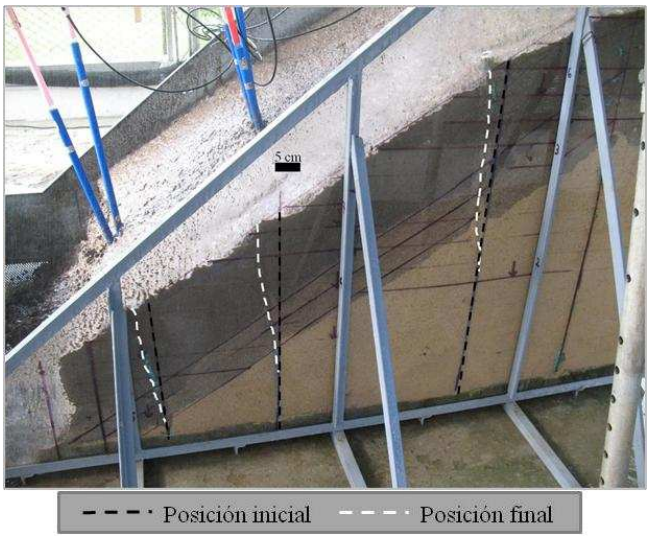


Figura 57. Movimiento del talud. Caso N° 7. Se evidencia el plano de falla muy cercano a la superficie del horizonte B.

6.3. Prueba de la hipótesis de trabajo.

La hipótesis de la investigación se cumplió para solo para los Casos N° 2 y 6 donde se presentaron asentamientos en la corona del talud sin que el grado de saturación del suelo llegara al 100% (Tabla 10).

La hipótesis se cumplió parcialmente para los Casos N° 1, 4. Donde las fallas se presentaron con la saturación de algunos sectores del talud más no se requirió que todo el talud se encontrara saturado (Tabla 10).

La hipótesis no se cumplió para los casos 5 y 7 pues se requirió que todos los sectores del talud estuvieran saturados al 100% (Tabla 10).

En este sentido se podría aceptar la hipótesis de que las fallas en este tipo de suelos y al aplicar esta clase de modelo físico se pueden presentar en condiciones no saturadas

Tabla 10. Grado de saturación en el cual se presentaron las fallas en el talud

Caso N°	Estado de falla	Tipo de falla	Tiempo de inicio	Lluvia acumulada	Nivel freático	Saturación (X)							
			horas	mm (Z)	cm (Z)	(%)							
						S1*	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
1	1	Desgarres superficiales	1,00	60,0	-	70,9	100	83,5	70,1	60,7	87,0	71,0	59,7
2	1	Desgarre superficial en el pie del talud	1,00	13,0	-	72,4	63,7	82,9	70,3	61,2	84,0	71,2	59,7
	2	Movimiento horizontal en la corona horizonte AB	3,50	66,3	-	74,7	68,0	85,5	71,7	62,8	86,5	72,0	63,3
4	1	Movimiento vertical en la corona del talud	2,00	-	72,0	62,8	55,2	100	78,0	57,6	100	66,0	58,0
	2	Grieta de tensión en el pie del talud	3,00	-	72,7	63,2	55,2	100	100	59,0	100	100	59,2
	3	Se activó movimiento tipo cuña en la base del talud	5,90	-	73,5	68,1	55,3	100	100	73,8	100	100	86,1
	4	Segundo movimiento tipo cuña en la base del talud	8,00	-	74,0	100	58,2	100	100	75,1	100	100	86,1
5	1	Movimiento traslasional horizonte A, AB y menor proporción B	29,5	-	87,5	100	100	100	100	100	100	100	100
6	1	Movimiento vertical en la corona del talud	0,16	-	82,0	70,7	63,3	79,2	68,9	60,03	83,9	77,1	61,2
	2	Grieta en el pie	0,23	-	82,5	71,7	63,2	79,1	68,5	60,1	100	100	61,2
	3	Activación grieta en el pie	1,50	-	92,5	72,1	63,3	100	100	60,1	100	100	100
	4	Movimiento tipo cuña en el pie del talud	2,60	-	92,5	100	61,8	100	100	100	100	100	100
7	1	Inicio de movimiento regresivo y flujo de lodo en la base del talud	6,15	3,33	92,5	100	100	100	100	100	100	100	100

* S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 y S8: Distribución de tensiómetros en el talud

7. Conclusiones recomendaciones

7.1 Conclusiones

Las conclusiones, recomendaciones y la discusión de los resultados de la investigación tienen un alcance limitado dado que el sitio de muestro podría no representar el comportamiento general de la Unidad de Suelos San Simón, dada la heterogeneidad de la misma que es gobernada por los factores de formación del suelo. Una de las limitaciones claras del modelo, es el problema de la escala en cuanto a la magnitud de los esfuerzos y el trabajo con muestras alteradas que de una u otra forma afectan la estructura de los suelos residuales. Las ideas que se consignan son el resultado del análisis de la información siguiendo los criterios de ingeniería y edafología que contribuyen a explicar algunos comportamientos y aplicar procedimientos en la práctica de la ingeniería geotécnica.

Este tipo de modelos físicos pueden contribuir en la evaluación del comportamiento de la humedad en el perfil de suelo y los cambios en el desplazamiento de suelos no saturados sujetos a la lluvia o flujos de agua subsuperficial. Con la ayuda de instrumentos de bajo costo relativo, además contribuyen a clarificar los procesos físicos asociados a la falla de los taludes.

Para las condiciones de la investigación, se observó que el suelo es altamente susceptible a la erosión hídrica, la cual cuando es severa puede desencadenar movimientos en masa someros.

Una lluvia intensa y corta no necesariamente causó la saturación inmediata del subsuelo, ésta generó principalmente la saturación de la base de ladera, la erosión laminar y desgarres

superficiales someros. En tanto, una cantidad de lluvia menor pero más prolongada en el tiempo, además de causar la saturación del pie de la ladera permitió la saturación más rápida del subsuelo.

Poco después del inicio de la infiltración por la lluvia, la succión se incrementó, seguido de una caída por debajo del valor inicial al finalizar la misma. La explicación probable para esto es el aumento de la presión de aire con el inicio de la infiltración.

Al finalizar las lluvias, la succión continuó su disminución en la base del talud y el subsuelo, mientras que ésta se incrementó nuevamente en la sección media y corona del mismo.

El estado inicial del talud, con una succión alta y con grietas producto del secado y humedecimiento, permitió que la lluvia directa favoreciera la saturación de la base del talud y de los horizontes más superficiales y no contribuyó a la saturación inmediata del subsuelo. Lo cual tendría implicaciones directas en los mecanismos de falla. El agrietamiento del suelo debido a los procesos de secado y humedecimiento puede tener impacto en la estabilidad del mismo, dado que se demostró la pérdida más rápida de succión al inicio de las lluvias después de un periodo de sequía y al estar el suelo afectado por grietas de expansión.

En el caso de la simulación de la infiltración de agua en la espalda del talud. Se demostró que la falla puede ocurrir relativamente distante al sitio de infiltración del agua y se puede generar por el inicio en la pérdida de succión de la base del talud y/o por los cambios rápidos en la cabeza de agua. La diferencia en la permeabilidad de los horizontes de suelo puede influir en el sitio y tipo de falla y puede limitar el plano de falla.

Opuesto a lo ocurrido con la lluvia simulada los modelos físicos evaluados con filtración de agua en la espalda o corona en este tipo de suelo, presentan mejor comportamiento experimental al causar procesos de falla más relevantes.

Una vez saturado el talud, un lluvia intensa de muy corta duración puede desencadenar flujos de suelo superficiales, movimientos lineales y en cuña remontantes.

El incremento rápido del nivel freático, una vez se encuentra saturado el talud puede desencadenar movimientos en masa mayores, su tamaño y mecanismo de falla posiblemente se debe a las características físicas de los horizontes de suelo en especial las diferencias en la permeabilidad.

Se demostró que el suelo puede fallar en diferentes condiciones de saturación, suelo no saturado, saturación parcial de algunos sectores del talud y suelo saturado.

Las fallas en el pie del talud y el movimiento vertical en la corona del mismo, fueron las fallas más recurrentes en los modelos investigados.

7.2. Recomendaciones

7.2.1 Manejo del suelo e implicaciones en el sistema de cultivo

Las observaciones permiten evidenciar que el suelo de la unidad San Simón, similar al del sitio estudiado, es susceptible a la erosión por la escorrentía y el impacto de las gotas de lluvia. La erosión severa en este suelo puede desencadenar movimientos en masa someros. Dada la alta susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica, gobernada por sus contenidos bajos de materia orgánica y cohesión, una de las principales medidas de prevención y mitigación de la misma es el uso de coberturas vivas que atemperen el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo y las prácticas culturales que contribuyan al aumento de los contenidos de la materia orgánica estable del suelo y con esta la cohesión.

Las prácticas de manejo de aguas en los cafetales deben conducir a evitar o retardar la saturación de la base del talud. Lo anterior por medio del establecimiento de sistemas de drenaje o árboles con alta capacidad de evapotranspiración en la base de las laderas.

En los períodos prolongados de sequía se debe mantener el suelo con coberturas vivas y/o muertas para disminuir la presencia de grietas de expansión superficiales que pueden tener implicaciones en la estabilidad del suelo.

La circulación de aguas subterráneas y las presiones intersticiales asociadas a ella, exige un tratamiento más riguroso de los aspectos hidrogeológicos del análisis de estabilidad de laderas, que considere la incidencia de las infiltraciones distantes en ella y los cambios repentinos del nivel freático.

El uso adecuado del suelo debe ser en bosques y sistemas agroforestales que brinden cohesión adicional al suelo en los diferentes estratos y que regulen los excesos de humedad; e igualmente que mediante la evapotranspiración contribuyan al aumento de la succión.

7.2.2 Sobre la investigación mediante modelos físicos experimentales

Aunque sería más recomendable la investigación en centrifugas geotécnicas, su alto costo la hace poco accesible, por lo cual se recomienda acoger la investigación para el diseño y construcción de mini centrifugas con fines de educación y experimentación en la geotecnia

Se recomienda experimentar con simulaciones de lluvia de más baja intensidad y por tiempo más prolongado, e incorporar sensores electrónicos de movimiento al talud los cuales son de costo bajo relativamente. Igualmente buscar sensores para la medición de humedad volumétrica de más fácil acceso que los equipos TDR.

Experimentar con infiltrómetros en el campo que incorporen la medición simultánea de la succión y tener modelos físicos, instrumentados en el campo con la lluvia natural. Por último experimentar con suelos contrastantes en sus características físicas y/o en su estado de mineralización.

Literatura citada

ABRAMSON, L.W.; LEE, T.S.; SHARMA, S.; BOYCE, G.M. (2002) Slope stability and stabilization method". 2a. ed. New York : John Wiley & Sons, 712 p.

ACHARYA G.; COCHRANE, T.A.; DAVIES T.; BOWMAN E. (2009). The influence of shallow landslides on sediment supply: A flume-based investigation using sandy soil. Engineering Geology 109(3-4):161-169.

ALEOTTI, P. (2004). A warning system of rainfall-induced shallow failure. Engineering Geology 73: 247–265.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) Standard D3080 – 04. (2004a). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI:10.1520/D3080-04, www.astm.org. (Consultado En línea. Agosto de 2011).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) D2435 – 04. (2004b). Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using

incremental loading. ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI:10.1520/D2435-04, www.astm.org. (Consultado En línea. Agosto de 2011).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) Standard D5298 – 10. (2003). Standard test method for measurement of soil potential (Suction) using filter paper. ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/D5298-10, www.astm.org. (Consultado En línea. Agosto de 2011).

BAVER, L.D.; WILFORD R.; GARDNER H. W. (1973). Física de suelos. Centro regional de ayuda técnica. 4ed. México. 529p.

BELL, F. G.; CULSHAW, M. G. (2001). Problem soils: a review from a British Perspective. En: JEFFERSON I., MURRAY E.J., FARANGHER E.; FLEMING P.R. (Eds), Problematic soils. Thomas Telford, Nottingham, 130 pp.

BELTRAN, J.; CASTIBLANCO, W.; ALFARO, A. (2006) Evaluación de Zonas con posible amplificación topográfica y susceptibles a deslizamientos debido a un sismo en Ibagué-Colombia. IMME 44(3) 9-16.

BLAKE, G.R.; HARTAGE, K.H. (1986A). Bulk density. En: KLUTE, A. “Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods”. 2nd. ed. Madison : American society of agronomy : Soil science society of America. p. 363-375.

-----. (1986b). Particle density.. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2nd. ed. Wisconsin : American society of agronomy : Soil science society of America. p. 377-382.

BRAND, E.W. (1985). Predicting the performance of residual soil slopes. Proceedings of the eleventh international conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, 12-16 August, 1985. Volume 5, pp 2541-2578.

BROOKS, S.M; ANDERSON, M.G. (1995). The determination of suction-controlled slope stability in humid temperature environments. Geografiska Annaler 77A (1-2):11-22.

BUJANG, B. K.; FAISAL, H. J.; LOW, T. H. (2006). Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. Geotechnical and Geological Engineering 24: 1293 – 1306.

CARRILLO, I. F. (1985). Manual del laboratorio de suelos. Chinchiná : CENICAFE, 111 p.

CASSEL D.K.; KLUTE A. (1986). Water Potential: Tensiometry. In: KLUTE A. Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph 9, 2ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin USA. pp 563-596.

CENICAFÉ - CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ (2009). Informe anual de labores 2008 – 2009. Resúmenes. Chinchiná, Cenicafé. 300p.

CICHOTA R.; HURTADO A. L. B.; VAN LIER Q. D. (2008). Performance of a multi-level TDR system exposed to tropical field conditions – A time-space comparison with tensiometry. Journal of hydrology 352: 181-190.

CROZIER M. J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model. Earth Surface Processes and Landforms 24: 825–833

CROZIER M. J. (2010). Deciphering the effect of climate on landslide activity: A review. Geomorphology (124): 260 -267.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P. L. (1986). Porosity. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2nd. ed. Madison : American society of agronomy : Soil science society of America. p. 443-461.

DAVIES, P. (1985). Influence of organic matter content, moisture status and time after reworking on soil shear strength. The Journal of Soil Science 36(2):299-306.

DAS, B. M. (2002). Principles of geotechnical engineering. 5a. ed. Toronto : Thomson Learning, 589 p.

ECHEVERRI R., O. (2005). Efecto de la microestructura en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de algunos suelos provenientes de rocas ígneas presentes en Medellín. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil. Tesis de Maestría para optar al título de Magister en Ingeniería Geotecnia. 104 p.

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. BOGOTA. COLOMBIA (1973). Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento del Tolima. Programa de desarrollo y diversificación de zonas cafeteras Bogotá. FNC. 93 p.

FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. BOGOTA. COLOMBIA (1985). Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafeteria del departamento del Huila. Programa de desarrollo y diversificación de zonas cafeteras. Bogotá. FNC. 235 p.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal 15(3):313–321.

FREDLUND D.G.; XING A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal 31. 521-532.

FREDLUND D.G. (2006). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 132 (3):286-321.

FUKUZONO T. (1987). Experimental study of slope failure caused by heavy rainfall. Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim (Proceedings of the Corvallis Symposium, August, 1987). IAHS Publ. no. 165. Japón, pp. 113-114.

GAN, J.K.M.; FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. (1988). Determination of the shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal 25: 500-510.

GARCÍA, E.; UCHIMURA, T. (2007). Estudio del mecanismo de falla de terraplenes debido a la infiltración de aguas lluvias mediante el monitoreo de presiones de poros y contenidos de agua. Dyna 74(152): 125-135.

GARDNER, H. W. (1986). Water content. En: Klute A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2nd. ed. Wisconsin : American society of agronomy : Soil science society of America. p. 493-544.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. (1986). Particle size analysis.. In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis. 2nd edition. Agronomy Monograph N° 9. Madison, Wisconsin, USA. pp. 383-411.

GERMER, K.; BRAUN, J. (2011). Effects of saturation on slope stability: Laboratory experiments utilizing external load. Vadose Zone Journal 10(2)477 – 486.

GÓMEZ A., A.; ALARCÓN C., H. (1975). Erosión y conservación de suelos en Colombia. En: GÓMEZ A., A.; GRISALES G., A.; SUÁREZ S., J. Manual de conservación de suelos de ladera. Chinchiná (Colombia), Cenicafé. pp. 1-15.

GÓMEZ, I. S.; VÉLEZ O., M.V. (1990). Predicción de las fluctuaciones de niveles freáticos a partir de precipitaciones y su influencia en la estabilidad de taludes en la Meseta de Bucaramanga, I Conferencia Colombiana de Geología Ambiental, Resúmenes, Sociedad Colombiana de Geología, Medellín. p. 20.

GONZALES, I. H.; LONDOÑO, G. A. C. (2002). Catálogo de las unidades Litoestratigráficas de Colombia. Gabro de Anserma (K_2gban). Cordillera Occidental. Departamento de Caldas. República De Colombia. Ministerio De Minas Y Energía. Instituto De Investigación E Información Geocientífica, Minero-Ambiental Y Nuclear. Bogotá D.C. 13p.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. (1996). Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization. A practical guide for erosion control. Nueva York (Estados Unidos), John Wiley and Sons, 378 p.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. (1911). Study on soil physics I. Flow of air and water in soils. Journal of Agricultural Science 4: 1–24.

GRISALES G., A. (1977). Suelos de la zona cafetera. Clasificación y uso. Fondo Cultural Cafetero. Medellín. 155p.

HILLEL, D. (1998). Environmental soil physics. Academic Press Inc. San Diego. 413p.

HO, D.Y.F.; FREDLUND, D.G. (1982). Increase in strength due to suction for two Hong Kong soils. Proceedings, American society of civil engineers geotechnical engineering division specialty conference, Honolulu, Hawaii. pp 263-295.

HOYOS P., F. (1990). Efectos de infiltraciones distantes en la inestabilidad de las laderas de alta pendiente. Boletín de Vías 17(71):98-128.

HOYOS P., F. (2006). Y sin embargo se mueve. Elementos de análisis de estabilidad de taludes y laderas. Instituto de Estudios de Infraestructura, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 319 p.

HU, R.; CHEN, Y.; ZHOU, C. (2011). Modeling of coupled deformation, water flow and gas transport in soil slopes subjected to rain infiltration. Science China Technological Sciences, 54(10): 2561 – 2575.

INGEOMINAS. (1996). Mapa geológico del Departamento del Tolima. INGEOMINAS. Escala 1:250.000. Versión digital. Santa Fe de Bogotá.

IRVING, M, E. (1971). La evolución estructural de los andes más septentrionales de Colombia. Boletín Geológico 19(2): 1-90.

IVERSON R. M.; REID M. E.; IVERSON N. R.; LAHUSEN R. G; LOGAN M, MANN J. E; BRIEN D. L. (2000). Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity. Science, 290(5491): 513-516.

JAIMES E.; DE FREITAS M. (2006). An Albian–Cenomanian unconformity in the northern Andes: Evidence and tectonic significance. Journal of South American Earth Sciences 21 466–492-

JIA G. W.; ZHAN, L.T; CHEN Y. M.; FREDLUND D. G. (2009). Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels. Engineering Geology (106): 92–103.

KLUTE A. (1986). Water retention: Laboratory methods In: KLUTE A. Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph 9, 2ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin USA. pp 635-662.

KLUTE A.; DIRKSEN C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. En: KLUTE A. “Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods”. Agronomy Monograph 9, 2ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin USA. p. 687-734.

LEE M.; KASSIM A.; GOFAR N. (2011). Performances of two instrumented laboratory models for the study of rainfall infiltration into unsaturated soils. Engineering Geology 117: 78–89.

LING, H.; WU, M.; LESHCHINSKY, D.; LESHCHINSKY, B. (2009). Centrifuge modeling of slope instability. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135(6): 758 - 767.

LÓPEZ R., E. (2004). Deep crust models of Colombia. República de Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Instituto Colombiano de Geología y Minería. INGEOMINAS. Bogotá D.C. 43p.

LOURENCO S.; SASSA K.; FUKUOKA H. (2006). Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides. Geomorphology 73: 115–130

MANTILLA, G.; DE LA TORRE, L.S.; GÓMEZ, C.E.; ORDOÑEZ, N.; CEBALLOS, J.L.; EUSCATEGUI, C.; PEREZ, P.; PEREZ, S.; MARTÍNEZ, N.; SANCHEZ, R.; MALDONADO, N.; PÉREZ, S.; GAITÁN, J.; CHAVES, L.; CHAMORRO, C.; FLOREZ, A. (2001). Los suelos: estabilidad, productividad y degradación. In: LEIVA, P. El medio ambiente en Colombia. IDEAM Bogotá, 2° edición. pp 228 – 277.

MAYORGA M., R. (2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias – Departamento de Geociencias. Programa de Postgrado – Magister en Meteorología. Bogotá, D.C., Junio de 2003. 208 p. Tesis para optar el título de magister en Meteorología. (Director Álvaro J. González Ingeniero Civil, M.Sc.)

MEDINA L., S.B.; SALAZAR G., L.F. (2009). Relación entre la resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé (60) 3: 253-268.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. (1979). Multiple- intensity rainfall simulator for erosion research on row side slopes. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 22:100-103.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL – MINAGRICULTURA. (2008). Reactivación agropecuaria y mayor bienestar en el campo. Memorias 2007-2008. Bogotá (Colombia), Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 191 p.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2010) Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente. NSR – 10. Comisión Asesora Permanente Para El Régimen De Construcciones Sismo Resistentes. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica Bogotá D.C. 130p.

MIYAZAKI, T. (1993). Water flow in soils. Marcel Dekker, Inc. New York. 296 p.

MORTRASIO, L.; VALENTINO, R (2007). Experimental analysis and modelling of shallow landslides. Landslides (4):291-296.

NUÑEZ A. (1998). Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia. Jurasico. Batolito de Ibagué. República de Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Instituto de Investigaciones e Información Geocientífica, Minero - Ambiental y Nuclear. 22 p.

OLIVARES, L.; DAMIANO, E.; GRECO, R.; ZENI, L.; PICARELLI, L.; MINARDO, A.; GUIDA, A.; BERNINI, R. (2009). An instrumented flume to investigate the mechanics of rainfall-induced landslides in unsaturated granular soils. Geotechnical Testing Journal, 32(2): 1-11.

OMAR, M.; SHANABLEH, A.; TAHMAZ, A. (2004). Shear strength of compacted green clay physic-chemical factors. Lowland Technology International 6(1):9-20.

PICARELLI, L.; OLIVARES, L.; DAMIANO, E. (2006). “Discussion to “Evaluation of landslide triggering mechanisms in model fill slopes” by W.A. Take, M.D. Bolton, P.C.P. Wong, and F.J. Yeung [Landslides 1(3):173–184, October 2004] and “A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall” by H. Ochiai, Y. Okada, G. Furuya, Y. Okura, T. Matsui, T. Sammori, T. Terajima, and K. Sassa [Landslides 1(3):211–219 (October 2004)]”. Landslides 3:269–272.

RAHARDJO H.; ONG T. H.; REZAUR R. B.; LEONG E. C.; FREDLUND D. G. (2010). Response parameters for characterization of infiltration. Environment Earth Science 60:1369–1380.

RASSAM, D.W.; COOK, F. (2002). Predicting the shear strength envelope of unsaturated soils. Geotechnical Testing Journal 25(2):215 – 220.

RENWICK W.; BRUMBAUGH R.; LOEHER, L. (1982). Landslide morphology and processes on Santa Cruz Island California. Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography 64 (3/4): 149–159.

RIVERA P., J.H.; SINISTERRA R., J.A. (2006). Uso social de la bioingeniería para el control de la erosión severa. Cali (Colombia), CIPAV, 110 p.

SÁNCHEZ T., E.; AHMED, K.; AWE, Y. (2006). Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia: un análisis ambiental del país para Colombia. Bogotá (Colombia), Banco Mundial – Mayo l Ediciones. 501 p.

SERNA G., C.A. (2009). Valoración contingente de la erosión de los suelos de la zona cafetera central de Colombia. Cenicafé (Colombia) 60(1):86-104.

SCHNELLMANN, R.; BUSSLINGER, M.; SCHNEIDER, H.R.; RAHARDJO, H. (2010). Effect of rising water table in an unsaturated slope. Engineering Geology (114): 71–83.

SHARMA, R.H; NAKAGAWA H. (2008). Numerical model and flume experiments of single and two layered hillslope flow related to slope failure. Landslides 7 (4):425-432.

SHAW M. C. (2001). Engineering problem solving. A classical perspective. Noyes Publications/William Andrew Publishing. New York (USA). 467 p.

SUÁREZ D. J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia). 548 p.

SUZUKI, M.; TSUZUKI, S.; YAMAMOTO T. (2005). Physical and chemical index properties of residual strength of various soils. Memoirs of the Engineering Faculty of Yamaguchi University 56(1):1-11.

TAKE, W.A.; BOLTON, M.D.; WONG, P.C.P.; YEUNG F.J. (2004). Evaluation of landslide triggering mechanisms in model fill slopes. Landslides (1): 173:184.

TERLIEN, M. T. J. (1998). Modeling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides. The integration of hydrologic model, slope stability models and Geographic Information Systems for the hazard zonation of rainfall-triggered landslides with examples from Manizales (Colombia). Enschede (Holanda), International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. 254 p.

TERZAGHI K; PECK R. B.; MESRI G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York. 529 p.

THOURET, J.C.; CANTAGREL, J.M.; ROBIN C.; MURCIA. A.; SALINAS, R.; CEPEDA, H. (1995). Quaternary eruptive history and hazard-zone model at Nevado de1

Tolima and Cerro Machín Volcanoes, Colombia. Journal of Volcanology and Geothermal Research (66) 397-426.

TOHARI, A.; NISHIGAKI, M.; KOMATSU M. (2007). Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineer 133 (5): 575-587.

TOPP, G. C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Research 16, 574-582.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). (1996). Soil survey laboratory methods manual: Soil survey investigations report No. 42 Version 3.0. Washington: USDA, 693 p.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). (2006). Claves para la taxonomía de suelos. Washington, NRCS. Décima edición. 339 p.

VARGAS, C.A.; KAMMER, A.; VALDES, M.; RODRÍGUEZ, C.E.; CANEVA, A.; SÁNCHEZ, J.J.; ARIAS, E.; CORTES, C.A.; MORA, H. (2005). New geological and geophysical contributions in the section Ibagué – Armenia, Central Cordillera – Colombia. Earth Sciences Research Journal 9(2): 99-109.

VILLAGÓMEZ, D.; SPIKINGS, R.; MAGNA, T.; KAMMER, A.; WINKLER, W.; BELTRÁN, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central Cordilleras of Colombia. Lithos 125 (2011) 875–896

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37:29-38.

WANG, Z. J.; FEYEN, D. R.; van GENUCHTEN, M. T. (1997). A two-phase flow infiltration equations accounting for air entrapment effects. Water Resources Research 33(2): 2759–2767.

WARTMAN, J. (2006). Geotechnical physical modeling for education: Learning theory approach. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice 132(4): 288 – 296.

WENG K., C. (2009). Effect of layering on slope instability induced by Rainfall. Faculty of Civil Engineering Universiti Teknologi Malaysia. project report for the award of the degree of Master of Engineering (Civil – Geotechnics). 106 p.

ZHAN, L. (2007). Soil-water interaction in unsaturated expansive soil slopes. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China 1(2): 198–204