



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL INICIO DE ALUVIONES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO COYA, MINA EL TENIENTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

FERNANDA GABRIELA ABARZÚA TORRES

PROFESOR GUÍA:
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS
YARKO NIÑO CAMPOS
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE
2013

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL INICIO DE ALUVIONES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO COYA, MINA EL TENIENTE

Los flujos de detritos, también conocidos como aluviones, son una constante preocupación, principalmente, para las mineras de la zona central de Chile. La predicción de estos eventos es fundamental para mejorar los sistemas de prevención y/o protección. Con el objetivo de avanzar en esta tarea, se ha desarrollado un estudio experimental que consiste en generar deslizamientos, bajo condiciones controladas. Para esto, se trabaja en una instalación compuesta por un canal prismático de 0.6mx2.0mx0.6m (ancho/largo/alto), que se rellena con material extraído de la cuenca alta del río Coya. El canal puede inclinarse desde 1° hasta 45°. A continuación del canal hay una rampa, con la misma inclinación del canal, que permite el tránsito del material removido.

Los experimentos consisten en la generación de un aluvión inducido por un flujo subsuperficial que se inyecta a la muestra de suelo. Este flujo subsuperficial se controla mediante un sistema de válvulas, ubicadas en la zona de ingreso del flujo a la muestra y en la zona por donde sale el caudal efluente. Se realizan nueve experiencias donde se combinan tres condiciones de pendiente, 33°, 38° y 43°; y tres condiciones de densidad inicial del suelo, 1600 kg/m³ (suelo suelto), 1700 kg/m³ (suelo medio) y 1800 kg/m³ (suelo compacto). El rango de densidades estudiado queda determinado por las densidades admisibles en la instalación experimental. El sistema de medición consta de cinco sensores de presión de agua, instalados en la base del canal, que controlan la dinámica del nivel freático. También se cuenta con cámaras con vista lateral y en planta del canal, que mediante procesamiento de imágenes (PIV) permiten obtener el campo de velocidad de la suelo detectando el inicio y la zona de falla.

La ladera, inicialmente estable, alcanza la condición de inestable debido a la presencia de la presión de agua, que disminuye el roce entre las partículas. Se encuentra una relación entre la densidad inicial del suelo y la altura del nivel freático, concluyendo que, mientras mayor es la densidad inicial del suelo, se requiere mayor presión de agua para alcanzar la inestabilidad y generar la falla. Se han identificado dos mecanismos de falla dependiendo de la densidad inicial del suelo. En suelo suelto el movimiento se inicia apenas entra el flujo subsuperficial, generando un reacomodo de las partículas que inhibe el alza de la zona saturada. La base de la falla coincide con el nivel freático por lo que la mayor parte de la zona en movimiento se encuentra no saturada. La falla no desencadena un aluvión. En suelo medio y denso, el movimiento inicia cuando el flujo subsuperficial ha alcanzado el nivel superficial, y se origina en la zona saturada generando un posterior aluvión. Cuando mayor es la densidad inicial del suelo, en este segundo mecanismo, la falla abarca un área mayor incorporando también zonas no saturadas al movimiento.

“Puedes caer mil veces, el asunto es que tengas la fuerza y el coraje de levantarte y volver a empezar”

(José Mujica)

Agradecimientos

Agradezco al **Tiempo** que constantemente me persigue, asusta y atrapa. Pero hoy miro hacia atrás y le agradezco. Le agradezco porque en el preciso instante en que estuve ahí, coincidí contigo, te sonreí, compartimos, y aprendí. Algo de ti llevo conmigo y gracias a esos miles de aportes me he construido y he logrado recorrer este extraño camino, no sé si avanzo o retrocedo, pero al menos he logrado vivir sin olvidar de sonreír. ¡Infinitas Gracias!

Mil gracias al equipo que trabajó para que aquellas madrugadas en el laboratorio de Don Pancho valieran la pena, partiendo por el todopoderoso Geovanni, el Pancho que ponía el toque justo en el lugar exacto y al capitán Don Chago.

Gracias también, a los profes de la Comisión, Santiago, Aldo, Yarko y Sergio por sus diversos aportes que fueron fundamentales para que este texto se convirtiera en algo, al menos un tanto, interesante de ojear. En especial a mis profes Aldo y Yarko, por su convencimiento de que no existe otra forma de hacer las cosas que de la mejor manera posible, mensaje que costó sudor e incluso lágrimas incorporar.

Gracias a todos mis amigos de la U, por las incontables anécdotas, carretes, historias que hacen de la U un lugar que me cuesta muuuuuuuuuuuucho dejar. En especial, al George, al Balbo y al Fepo, mis partners hidráulicos, que me ayudaron una y mil veces en momentos críticos, y a los compañeros de la pecera, el Cesar, el Jandri, la Pauli, el Oscar, la Fran (solo jueves en la tarde y semana por medio) por su compañía en este último proceso, quizá, el más lento de todos :S.

Y a quienes más les debo es al Chicomin, al Tincín, al Cristof, a la Gabrie y al Totein, mi familia, que me ama y apoya incondicionalmente, energía suficiente para levantarme incluso esos días donde todo se ve negro, pero bien negro.

Finalmente, y no por eso menos importante, te agradezco a ti, mi guapo, porque en tus brazos siento el planeta a mis pies, y me renuevo para continuar soñando con que este mundo puede ser un lugar mejor y con más igualdad.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Aspectos Generales	1
1.2	Objetivos del trabajo	2
1.3	Organización del Informe.....	2
2	Revisión Bibliográfica	4
2.1	Condiciones de inicio de aluvión	4
2.2	Método de Talud Infinito para el análisis de la estabilidad de laderas.....	5
2.3	El rol de la densidad y porosidad en el inicio de los aluviones.....	8
2.4	Modelo de deslizamientos en laderas debido a un flujo subsuperficial.....	9
2.5	Experimentos de inicio de aluviones.....	10
3	Diseño experimental y Metodología.....	12
3.1	Instalación Experimental.....	12
3.2	Sistema de control.....	13
3.2.1	Granulometría.....	13
3.2.2	Humedad	14
3.2.3	Contador de agua	14
3.2.4	Sensores de presión.....	14
3.2.5	Cámaras de video	16
3.3	Metodología	16
3.3.1	Carga del Material en el Canal.....	16
3.3.2	Flujo subsuperficial.....	17
3.3.3	Procesamiento de Imágenes.....	18
4	Procesamiento de datos y Presentación de Resultados	21
4.1	Presión y velocidades en el inicio del movimiento.....	21
4.2	Ejemplo del análisis de velocidades en un aluvión generado bajo condiciones controladas.....	28
4.3	Cálculo de los parámetros característicos de las fallas observadas	32
4.4	Condición final de la muestra	35
5	Análisis de Resultados	37
5.1	Dinámica del Nivel Freático	37
5.2	Formas de falla.....	40

5.2.1	Falla en suelo suelto.....	40
5.2.2	Falla en suelo medio.....	42
5.2.3	Falla en suelo denso	44
5.3	Análisis de Estabilidad	46
5.4	Análisis Adimensional	50
5.5	Fallas en terreno	54
6	Conclusiones.....	57
7	Bibliografía.....	60

Glosario

- τ_f : Esfuerzo de corte resistivo en la superficie de falla.
- σ : Esfuerzo normal total.
- W : Peso de la columna de suelo sobre la superficie de falla.
- θ : Ángulo de inclinación del talud.
- γ_t : Peso específico total de la muestra en el momento de la falla.
- γ_d : Peso específico suelo seco.
- γ_w : Peso específico del agua.
- σ' : Esfuerzo efectivo normal.
- φ : Ángulo de fricción interna del suelo.
- c : Cohesión del suelo.
- p : Presión de poros.
- τ : Esfuerzo de corte solicitante en la superficie de falla.
- h_f : Profundidad de la falla.
- h_w : Altura del nivel freático.
- V_s : Velocidad promedio del perfil transversal de velocidades superficiales cuya ubicación coincide con la posición de un sensor de presión.
- V_l : Velocidad promedio del perfil transversal de velocidades laterales cuya ubicación coincide con la posición de un sensor de presión.
- h_r : Diferencia entre la altura inicial del suelo y la altura final de la muestra luego de ocurrir la falla y remoción del material.
- $h_{N.F.}$: Al tura del nivel freático sobre la superficie de falla.
- α : Inclinación del nivel freático en la zona de falla con respecto a la plano determinado por la base del canal.
- L_a : Distancia desde el borde de aguas abajo del canal hasta el punto donde aflora el nivel freático.
- L_m : Largo de la muestra de suelo.
- ρ_t : Densidad total del suelo.
- ρ : Densidad inicial de la muestra de suelo.
- ρ_d : Densidad del suelo seco.
- ρ_w : Densidad del agua.
- W_s : Peso del suelo.
- W_w : Peso del agua.
- τ_{f_i} : Esfuerzo de corte resistivo en la dovela i.
- β_i : Inclinación de la superficie de falla en la dovela i.
- L_f : Largo de la zona de falla.
- L_{sat} : Distancia desde el borde de aguas abajo de la zona de falla hasta el punto donde aflora el nivel freático.
- D_{cf} : Distancia desde el borde de aguas abajo del canal hasta el centro superficial de la falla.
- P_o : Presión en la base del canal.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Aspectos Generales

A lo largo de la historia los flujos detritos, también conocidos como aluviones, han impactado a la sociedad arrasando con asentamientos humanos, tal como sucedió en el aluvión de la Quebrada de Macul en 1993 Santiago, Chile, donde fallecieron 26 personas y 8 desaparecieron. Los avances en esta línea de investigación se han enfocado en la compleja tarea de predecir estos eventos, estudiando la mecánica del fenómeno e identificando las variables asociadas a su desencadenación.

La generación de un aluvión se relaciona con las siguientes condiciones; la existencia de material removible, el aumento de la presión de poros debido al ingreso de agua al suelo y la pérdida de consistencia del suelo inestable, es decir, que el suelo disponga e incorpore agua suficiente tal que la masa de suelo en movimiento corresponda a una mezcla agua-suelo con propiedades de un fluido de altas concentraciones. A esto se suma la ubicación geográfica de la zona que comúnmente corresponde a laderas de alta pendiente. (Iverson et al., 1997)

Las condiciones hidrológicas relacionadas con el inicio de los aluviones son la precipitación (alta y moderada) y los deshielos debido a que entregan agua al subsuelo generando el aumento en la presión de poros (Blijenberg et al., 1996). Según estudios realizados por AC Ingenieros Consultores (1993), Golder Associates S.A. (2001) y APR Ingeniería S.A. (2008a) los aluviones en la cuenca alta del río Coya, ubicado de Rancagua a la cordillera, tienen en común que se inician producto de intensas lluvias en cortos periodos y de temperaturas relativamente altas, traduciéndose en un aumento del área aportante debido a que la línea de nieve sube sobre lo normal. Todo esto genera flujo en alturas mayores a las usuales, y por ende, en laderas de mayor pendiente. En el caso del gran aluvión de Sewell, en 1993, se tiene registro de precipitaciones a los 3850 m.s.n.m, siendo que, en las tormentas de invierno, la isoterma 0° varía entre los 1500m y los 2900m. Las intensas precipitaciones provocan la saturación del suelo comprometiendo la estabilidad del mismo y, en ciertos casos, gatillando el inicio de un aluvión.

Experimentalmente se ha observado que la respuesta de la mezcla suelo-agua al iniciarse el movimiento depende del grado de compactación del suelo. En el caso de un suelo relativamente suelto, al entrar el agua, la presión de poros aumenta rápidamente, generándose la licuefacción del suelo y con esto el inicio del flujo. Por el contrario, al entrar el agua en suelos densos se produce, en una primera instancia, el aumento del volumen (dilatación) del suelo que permite superar la resistencia existente entre partículas. Sin embargo, éste fenómeno reduce la presión de poros e inhibe el movimiento. Luego vuelve a aumentar la presión de poros logrando la licuefacción del suelo y el inicio del aluvión (Gabet y Mudd, 2006; Iverson et al., 2000).

Este estudio se enmarca en una investigación solicitada por Minera El Teniente, debido a que estos eventos acontecen con cierta periodicidad, obligándolos muchas veces a detener sus faenas. Entre los eventos de mayor relevancia de este último tiempo se encuentra el aluvión de Mayo de 1993 y el de Mayo de 2008. De acuerdo a los estudios realizados por APR Ingeniería S.A. (2008) eventos de menor magnitud habrían ocurrido en el 2002 y 2003. Golder Associates S.A (2009) también reporta eventos en Mayo de 1991, Febrero de 2008 y Mayo de 2009.

El estudio experimental busca comprender los procesos y variables que desencadenan los aluviones y encontrar valores críticos propios de la zona que luego podrán ser utilizados al momento de desarrollar modelos y protocolos de prevención y/o protección.

1.2 Objetivos del trabajo

El objetivo principal es estudiar el proceso mediante el cual se desencadena un aluvión, debido a la presencia de un flujo subsuperficial, variando las condiciones de pendiente y densidad del suelo.

Objetivos específicos:

- Puesta en marcha de la instalación experimental y sistemas de medición.
- Realizar experimentos de pruebas en el laboratorio con el fin de generar aluviones bajo condiciones controladas.
- Desarrollar un estudio experimental ensayando distintas condiciones iniciales en cuanto a densidad del suelo y pendiente.
- Identificar variables relevantes para el inicio de aluviones y determinar sus valores críticos que ayuden en la predicción de estos eventos en la zona de estudio.

1.3 Organización del Informe

El presente trabajo contiene la siguiente organización:

- Capítulo 1: Se introduce y define el tema a desarrollar.
- Capítulo 2: Se da a conocer el marco teórico relacionado con el fenómeno a partir de una revisión bibliográfica que incluye el estado del arte de estudios experimentales en el área.

- Capítulo 3: Describe la instalación experimental utilizada y presenta la metodología desarrollada para la generación y registro del inicio de los aluviones bajo condiciones controladas.
- Capítulo 4: Contiene los registros de la mediciones de velocidades y presiones durante las nueve experiencias y la descripción de las fallas observadas.
- Capítulo 5: Se realizan los análisis de los resultados obtenidos con el fin de encontrar patrones de comportamiento para las distintas condiciones estudiadas.
- Capítulo 6: Resume las principales relaciones y comportamientos detectados durante el desarrollo del estudio experimental y, se proponen desafíos y recomendaciones para estudios posteriores.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1 Condiciones de inicio de aluvión

Los aluviones son masas de sedimentos de diversos tamaños saturados con agua que se deslizan y transportan por terrenos con pendiente (Iverson et al., 2000).

El flujo aluvional se origina de diversas maneras, como por ejemplo por dilatación o licuefacción durante el movimiento (Johnson and Rodine, 1984, Johnson and Rhan, 1970). Otro mecanismo está relacionado con fuerzas externas como los temblores o fuertes impactos (Bovis & Dagg, 1987). También puede iniciarse en forma espontánea en suelos que se encuentran saturados producto de la filtración de agua y que presentan una lámina de agua de cierta altura (Takahashi, 2009) o por licuefacción espontánea y represamiento de aguas (Blijenberg et al., 1996).

Pequeños aluviones ocurren comúnmente en laderas o taludes que tienen una pendiente cercana al ángulo de reposo, ya que cuando éstos se saturan con agua, fallan. Grandes aluviones son resultados de numerosas y pequeñas fallas, que se unen y potencian generando la incorporación de sedimentos al flujo, o debido a fallas individuales que movilizan parcial o casi totalmente un volumen de sedimentos. Este movimiento es favorecido por la incorporación de agua a medida que se transporta (Pierson & Scott, 1985). Ambos casos tienen en común que el proceso se inicia con una falla gravitacional que afecta cierto volumen de masa de suelo con agua (Iverson et al. 1997).

La causa más común es el flujo generado por deslizamiento en laderas. En este caso para que se inicie el movimiento se requiere que la masa de sedimentos falle, agua suficiente para saturar estos sedimentos y una conversión de energía potencial en cinética capaz de transformar un deslizamiento localizado en la superficie de falla en un flujo propiamente tal (Iverson, 1997).

Blijenberg et al. (1996) estudiaron el inicio de aluviones desencadenados por la infiltración de agua debido a eventos de lluvia. La experimentación se realizó en el valle Bacherlard, ubicado al sur de los Alpes Franceses. Se utilizaron simuladores de precipitación que reproducían tormentas. La principal observación fue que para lluvias de altas intensidades

(cerca de los 100 mm/h) y pendiente mayor o igual a 34° o 36°, minutos después de alcanzado el tiempo de encharcamiento, se produce una falla en la capa superior del terreno que induce el movimiento de masa a micro escala con un ancho y largo de pocos centímetros. El tiempo de encharcamiento se refiere al tiempo que pasa desde que comienza la precipitación hasta que la capacidad de infiltración del suelo es menor a la intensidad de lluvia induciendo el inicio del flujo superficial. Para el caso de pendientes de 55° o más, la falla ocurría con intensidad de lluvia entre 60-70 mm/h.

En Chile, Lara y Sepúlveda (2010), realizaron un estudio en la Quebrada de San Ramón, ubicada en la precordillera, al este de la ciudad de Santiago de Chile. En esta zona se evaluó el peligro de aluvión basándose en la combinación de un análisis de susceptibilidad, el cual consiste en cuantificar factores de riesgo, como por ejemplo, el ángulo de la ladera, características geológicas y geotécnicas, acumulación de nieve, intervención artificial de la ladera, deslizamientos previos, entre otros. Para luego, aplicar un análisis de probabilidad de falla producto de una condición de saturación (precipitación) o por esfuerzos sísmicos, esto último, desde un enfoque geotécnico.

Otras investigaciones en esta área se han enfocado en correlacionar la intensidad y duración de precipitaciones con el inicio de eventos aluviales. Sin embargo, al ser métodos empíricos no proveen una base teórica fuerte que permita comprender cómo los procesos hidrológicos influyen en el lugar, tiempo y tamaño de los deslizamientos, o cómo puede variar el riesgo de aluviones debido a cambios en el clima o uso de suelo (Iverson 2000).

Estudios teóricos recientes buscan identificar la influencia de variables topográficas, geológicas, hidrológicas y de uso de suelo en la posibilidad de ocurrencia de los aluviones. Estos modelos trabajan con el principio de esfuerzo efectivo de Terzaghi, el cual relaciona la potencialidad de ocurrencia con la presión sub-superficial. A su vez, para determinar la presión subsuperficial, consideran que la infiltración producto de la lluvia controla el nivel freático en el suelo de forma cuasi-permanente y que el flujo subsuperficial es paralelo a la pendiente (Iverson y Major, 1987; Iverson et al., 2000).

Los estudios teóricos y experimentales coinciden en que la presión de poros interna en pendientes está fuertemente relacionada con los eventos de precipitación y que la redistribución de presiones presenta un importante componente normal a la pendiente (Iverson y Major, 1987; Iverson et al., 2000).

2.2 Método de Talud Infinito para el análisis de la estabilidad de laderas

Diversas observaciones en terreno, estudios experimentales y análisis teóricos muestran que el movimiento de masa en laderas ocurre como consecuencia de la aparición y propagación de la falla de Coulomb en el suelo (Iverson et al., 2000).

El criterio de la falla de Coulomb se define a partir de un modelo en dos dimensiones que describe el deslizamiento de materiales granulares a lo largo de una superficie, suponiendo que el deslizamiento es infinitamente largo en la dirección de la pendiente. Las variables involucradas son el esfuerzo de corte sobre la superficie de falla τ_f , el esfuerzo normal efectivo σ' actuando en la superficie de falla (positivo si es compresión), el ángulo de fricción

interna del suelo ϕ , que depende de la superficie de fricción de las partículas que componen el suelo y del grado de interferencia que hace una partícula sobre otra (interlocking), y, finalmente, la cohesión c , que depende de las fuerzas electrostáticas y la mineralización secundaria entre partículas (Mitchell, 1976). La cohesión tiende a cero una vez iniciado el desplazamiento (Skempton, 1985).

El esfuerzo de corte en la falla corresponde al determinado por la teoría de Coulomb y determina el máximo esfuerzo resistivo del suelo.

$$\tau_f = \sigma' \tan(\phi) + c \quad (1)$$

donde σ' es definido como:

$$\sigma' = \sigma - p \quad (2)$$

p es el efecto de la presión de poros producto del agua y σ es el esfuerzo normal total.

Los parámetros de terreno involucrados en el criterio de la falla de Coulomb se esquematizan en la Figura 2-1 donde h_{falla} es la profundidad de la falla, h_w es la altura del nivel freático, z la profundidad de la zona no saturada y θ la inclinación del talud.

Considerando W como el peso de la columna de suelo y θ el ángulo de inclinación del talud, el esfuerzo de corte solicitante y el esfuerzo normal están dados por:

$$\tau = W \sin \theta \quad (3)$$

$$\sigma = W \cos \theta \quad (4)$$

Sea γ_t el peso específico total del suelo, el peso de la masa de suelo más agua equivale a:

$$W = h_f \gamma_t \cos \theta \quad (5)$$

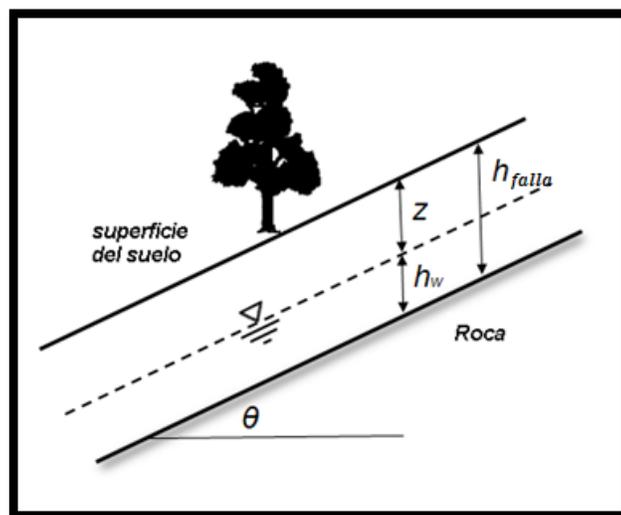


Figura 2-1. Esquema de la condición en terreno con los parámetros involucrados en la falla de Coulomb.

Reemplazando y considerando γ_w como el peso específico del agua se tiene:

$$\tau = h_f \gamma_t \cos \theta \operatorname{sen} \theta \quad (6)$$

$$\sigma = h_{fa} \gamma_t \cos^2 \theta \quad (7)$$

$$p = \gamma_w h_w \cos^2 \theta \quad (8)$$

$$\tau_f = c + (\gamma_t h_{falla} - \gamma_w h_w) \cos^2 \theta \tan \varphi \quad (9)$$

Se define el Factor de Seguridad:

$$F.S. = \frac{\text{Esfuerzos resistentes}}{\text{Esfuerzos Solicitantes}} = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + (\gamma_t h_f - \gamma_w h_w) \cos^2 \theta \tan \varphi}{h_f \gamma_t \cos \theta \operatorname{sen} \theta} \quad (10)$$

Tabla 2-1: Relación valor factor de seguridad y estabilidad del talud (Kayastha, 2006)

Estabilidad Talud	
F.S. > 1,5	Estable
1,25 < F.S. < 1,5	Moderadamente Estable
1 < F.S. < 1,25	Casi Estable
F.S. < 1	Inestable

Sin embargo, esta expresión es una simplificación de los factores que gobiernan la falla debido a que no considera el campo de esfuerzos producto de la velocidad del flujo. También la distribución espacial y magnitud de la presión de poros es determinante al momento de definir la superficie de falla (Iverson y Reid, 1992).

La distribución de la presión de poros determina el potencial de licuefacción del suelo. La licuefacción de un suelo se refiere a la condición en que la presión de poros es suficiente para que el esfuerzo efectivo normal en la masa de sólidos sea nulo (Youd, 1973; Casagrande, 1940).

La condición de licuefacción requiere que el gradiente vertical de presión de poros sea igual al gradiente vertical del esfuerzo normal total e igual al peso de la masa agua más sedimento. Esta condición implica que, si el esfuerzo normal efectivo es cero, el esfuerzo friccional entre partículas también tienen que ser cero. Si, más aún, la cohesión es cero, el comportamiento de la masa de suelo debiese ser como la de un líquido. Sin embargo, si el suelo es cohesivo, la única forma de que se produzca licuefacción del suelo es que esta cohesión se anule, lo cual ocurre durante un temblor o por un deslizamiento de tierra (Iverson et al., 1997).

Se desprende que es requisito para el inicio de una aluvión que exista una cantidad de agua suficiente para saturar el suelo (o estar cercano a esto) y presentar una presión de poros tal que se inicie la falla de Coulomb (Iverson et al., 1997).

2.3 El rol de la densidad y porosidad en el inicio de los aluviones

Algunos deslizamientos producen movimientos imperceptibles; por el contrario otros son catastróficos. Estudios muestran que el aumento de la presión de poros debido al agua genera distintos fenómenos dependiendo de la porosidad inicial (Iverson et al., 2000).

Varios estudios utilizan la teoría de la porosidad crítica la cual plantea que la licuefacción del suelo solamente ocurre si presenta una porosidad mayor a la porosidad crítica (Casagrande, 1940), y que la licuefacción en los deslizamientos de suelos durante eventos de precipitación es el principal mecanismo de generación de aluviones (Iverson et al., 1997). En suelos que presentan una porosidad muy por encima de la porosidad crítica, el deslizamiento ocurre luego de un aumento rápido de la presión de poros. Este aumento de la presión de poro genera una inmediata licuefacción del suelo en movimiento (Iverson et al., 2000). Por el contrario, los suelos que presentan una porosidad menor a la crítica antes deben alcanzar la porosidad crítica para que ocurra el colapso (Gabet y Mudd, 2006).

Iverson et al., 2000 demostró experimentalmente que en el caso de un suelo relativamente suelto, al entrar el agua, la presión de poros aumenta rápidamente, generándose la licuefacción del suelo, y con esto, el inicio del flujo aluvional. Por el contrario, al entrar el agua en suelos densos y producirse la falla, se genera un aumento del volumen (dilatación) del suelo, que se esquematiza en la Figura 2-2, y que permite superar la resistencia existente entre partículas. Sin embargo, este fenómeno reduce la presión de poros e inhibe el movimiento. Luego, vuelve a aumentar la presión de poros que potencia el movimiento inicial y permite, la posterior, licuefacción del suelo (Gabet y Mudd, 2006; Iverson et al., 2000).

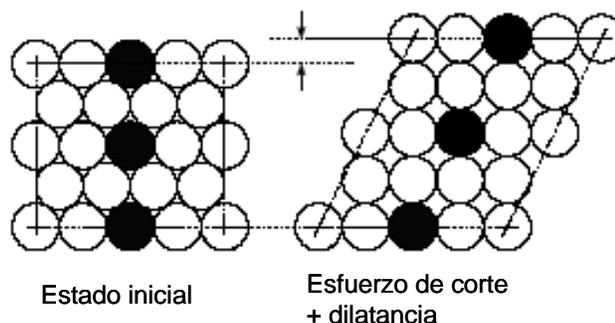


Figura 2-2: Esquema de fenómeno de dilatacia (Wang y Hutter, 2001).

2.4 Modelo de deslizamientos en laderas debido a un flujo subsuperficial

El modelo desarrollado para analizar la estabilidad de las laderas en cuencas acopla dos modelos, un modelo hidrológico y un modelo de estabilidad de laderas. Para esto, la cuenca se divide en celdas determinadas por la intersección entre las curvas de nivel y las líneas de flujo (Figura 2-3). El modelo hidrológico predice el grado de saturación del suelo en cada celda a partir de la intensidad y duración del evento de precipitación suponiendo que la tasa de infiltración ha alcanzado un estado estacionario, es decir, que la capacidad de infiltración del suelo siempre es mayor a la intensidad de la precipitación, por lo que la escorrentía superficial se ignora y solo se considera flujo subsuperficial. Luego, el grado de saturación se determina a partir del área que contribuye a cierto elemento. El área contribuyente a una celda se define como todas las celdas pendiente arriba, cuyas líneas de drenaje converjan a la celda en cuestión. Esta metodología supone que la recarga es espacialmente uniforme por lo que el flujo subsuperficial es proporcional a la recarga y al área pendiente arriba. El programa considera que la distribución del flujo subsuperficial (nivel freático) está principalmente determinado por la topografía de la cuenca, es decir, el nivel freático es paralelo a la pendiente topográfica. Conociendo el nivel freático en cada celda se puede aplicar el modelo de estabilidad de laderas. El modelo utilizado corresponde al de estabilidad de laderas con talud infinito (falla de Coulomb), que se traduce en el cálculo del factor de seguridad en cada celda. La teoría de talud infinito se considera válida ya que el largo de la ladera es mucho mayor al espesor de la falla y debido a que se supone que el plano de falla es aproximadamente paralelo a la pendiente topográfica (Montgomery & Dietrich, 1994).

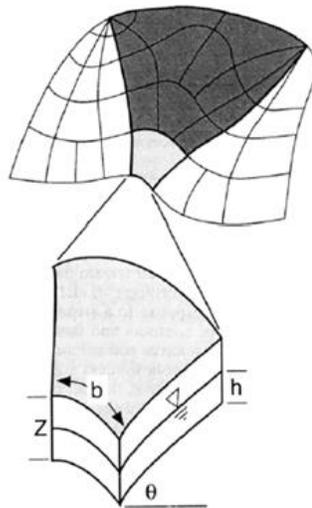


Figura 2-3: Discretización de la cuenca en modelo de estabilidad de laderas producto de un flujo subsuperficial (Montgomery y Dietrich, 1994).

Con el fin de simplificar el modelo, y debido que es difícil conocer como varían ciertas variables en el espacio, se considera constante el espesor del suelo y las propiedades del suelo como la transmisividad hidráulica.

Para mejorar la predicción de laderas inestables Lanni et al., 2011 estudia en mayor profundidad los principales factores que determinan el contenido de humedad del suelo

frente a un evento de lluvia detectando que la humedad y el nivel freático del suelo son resultado del balance entre la recarga, la acumulación pendiente arriba y la eficiencia en el drenaje pendiente abajo. Luego, se agrega un nuevo factor al modelo hidrológico, ya que ahora debe considerar dos fenómenos, los efectos advectivos, producto de la pendiente topográfica, y los difusivos, producto de las presiones que pueden variar debido a un cambio en las características del suelo, tanto aguas arriba como aguas abajo (Lanni et al., 2011). En este segundo fenómeno juegan un rol fundamental las depresiones de la base rocosa del suelo, afectando directamente la dinámica de la presión de poros. Estas depresiones inducen un aumento localizado de la presión de poros que se traduce en un rápido paso de ladera estable a ladera inestable y que no es predecible a partir de la pendiente topográfica (Lanni et al., 2012).

Como se pudo notar en los modelos mencionados, para el análisis de estabilidad de laderas es ampliamente utilizado el modelo de estabilidad de laderas de talud infinito, ya que permite representar la condición de las zonas precordillerana y cordillerana de las cuencas suponiendo que el largo de la ladera es mucho mayor que la profundidad de la falla. Sin embargo, al realizar la discretización de la cuenca en celdas toma relevancia qué tan grande debe ser la proporción entre el largo de la ladera y la profundidad de la falla tal que el modelo sea aplicable. Para analizar esta situación se compara los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos con el método de talud infinito para diferentes relaciones largo ladera/profundidad de falla y para distintos valores de las propiedades del suelo, concluyendo que el método de talud infinito es válido para la relación largo/profundidad igual o mayor a 25. Las propiedades del suelo podrían disminuir este valor como, por ejemplo, en caso de que el suelo fuera un suelo no cohesivo. También se observó que en caso de existir la presencia de un flujo lateral que afecta la presión de poros se minimiza el error observable para relaciones menores a 25.

2.5 Experimentos de inicio de aluviones

Iverson (2000) realizó pruebas experimentales del inicio de aluviones en un canal rectangular que contenía 6 m³ de suelo franco arenoso. La base del canal era de concreto y estaba inclinada en 31° con respecto a la horizontal. La muestra de suelo fue sometida a un flujo subsuperficial cuasi paralelo que entraba por conductos ubicados en la base del canal y a un aporte superficial debido a simuladores de lluvia. El objetivo del estudio era analizar el comportamiento del suelo bajo distintas porosidades iniciales (suelo suelto y suelo compacto), que variaban según la metodología de carga del material. Las variables controladas eran la presión de poros, el esfuerzo cortante del suelo y la deformación del suelo a distintas profundidades en tres zonas a lo largo del canal.

Se observó que para la condición de suelo suelto (porosidad inicial de 0.52) la presión de poros aumenta rápidamente durante la falla y presenta valores cercanos al balance total de esfuerzos normales permitiendo la licuefacción del suelo. Esta falla ocurre en un periodo de tiempo corto alcanzando velocidades mayores a 1 m/s en un segundo. En el caso de suelo compacto (porosidad inicial de 0.41) la falla ocurre gradualmente. Cuando se inicia el movimiento, se observa una disminución de la presión de poros lo que se asocia con la dilatación del suelo y retarda el movimiento. Luego, la presión de poros se recupera, potenciando nuevamente el movimiento. Durante la falla, se observan varios pulsos con este mismo comportamiento (Iverson et al., 2000).

Reid (2007) realizó un experimento similar al anterior, es decir, generó aluviones bajo condiciones controladas utilizando un canal prismático con pendiente de 31° y un volumen de suelo entre 5.3 y 6.4 m^3 con el objetivo de comparar tres condiciones hidrológicas, flujo subsuperficial, intensidad de lluvia moderada prolongada y alta intensidad de lluvia. La muestra de suelo escogida era relativamente homogénea e isotrópica. La base del canal tenía conductos por donde se inyectaba el flujo subsuperficial a lo largo del canal. También contaba con simuladores de lluvia. Se trabajó con la densidad que resultaba al cargar el suelo mediante palas, es decir, con densidad baja. Las variables controladas fueron la humedad, la presión de poros y el esfuerzo cortante del suelo a distintas profundidades. El flujo se aplicó de tal manera que el nivel del agua fuese paralelo a la pendiente del canal, para esto se controlaba el flujo de entrada y el drenado (Reid et al., 2007).

Las principales observaciones fueron que bajo las tres condiciones hidrológicas se generó la falla y movilización de material. Y que con flujo subsuperficial y alta intensidad de lluvia se induce una falla completa y abrupta mientras que en lluvia moderada y prolongada la falla es más pequeña. En el caso de flujo subsuperficial y lluvia moderada prolongada la falla ocurre cuando el nivel de agua se eleva generando una gran región con presión de poros positiva y creciente y que durante la falla se producen aumentos rápidos y localizados de la presión de poros, inclusive en zonas no saturadas. En el caso de alta intensidad de lluvia la falla ocurre sin presentar una región amplia de presión de poros positivas (Reid et al., 2007).

Capítulo 3

Diseño experimental y Metodología

3.1 Instalación Experimental

La instalación experimental consiste en un canal rectangular con dos zonas, la primera contiene el material y la segunda permite que escurra el material removido. La parte de la instalación que contiene el material, tiene un largo de 210 cm, un alto de 58 cm y un ancho de 60 cm. La segunda parte, es decir, la rampla que permite el deslizamiento del material, tiene 300 cm de largo y un alto y un ancho de 50 cm y 60 cm respectivamente (Figura 3-1). El canal está hecho de láminas de aluminio a excepción de una de las caras laterales que es de acrílico transparente que permite visualizar la dinámica del material durante la experiencia. Para los experimentos con pendiente 33° se colocó una delgada lámina de acrílico a la cara lateral de aluminio que está en contacto con el material con el objetivo de tener la misma condición de aspereza en ambos lados y comparar los resultados con los experimentos que se habían realizado con distinta aspereza.

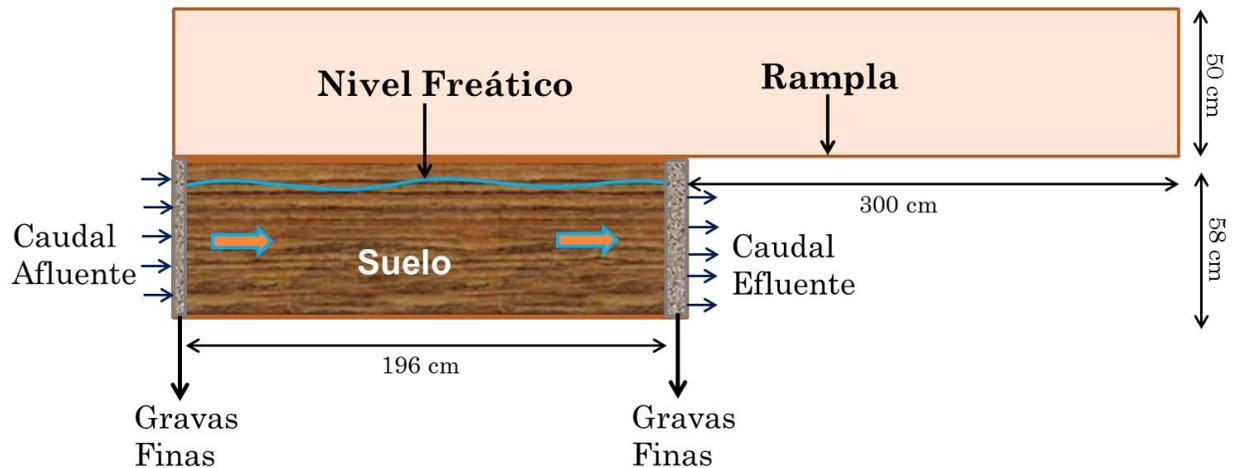


Figura 3-1: Esquema de la vista lateral de la instalación experimental.

El canal se eleva gracias a un tecele mecánico (figura 2-2(a)) y alcanza una inclinación de hasta 43 grados.

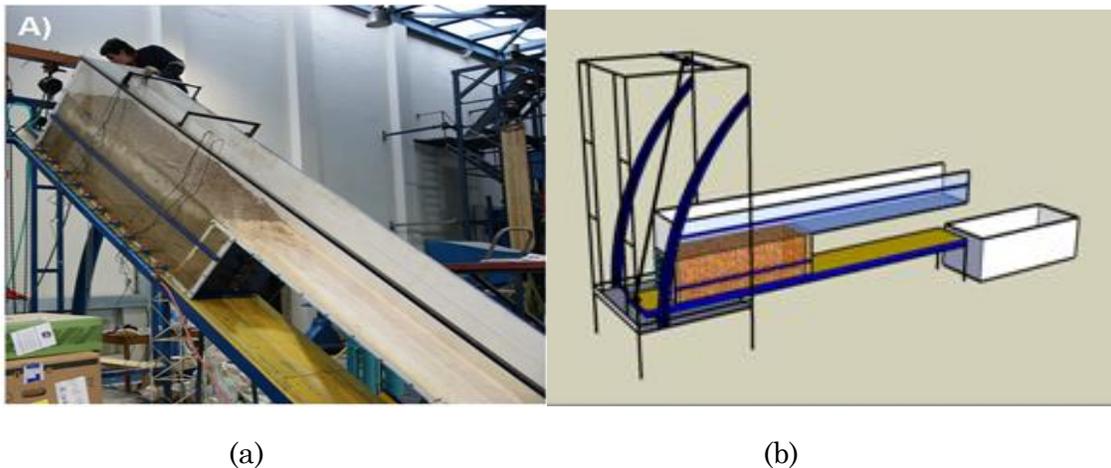


Figura 3-2: Instalación Experimental. En (a) una imagen del canal inclinado y en (b) un esquema de la instalación antes de inclinar.

El caudal subsuperficial afluente ingresa a la muestra de suelo por 15 tuberías, de 3 cm de diámetro, uniformemente distribuidas en la cara transversal de aguas arriba y que están conectadas a la red de agua potable. El caudal de entrada se controla con una válvula. El caudal subsuperficial efluente sale por 15 tuberías del mismo diámetro que las de entrada e instaladas en la cara transversal de aguas abajo, donde, mediante un arreglo de válvulas, es posible controlar la altura de agua a la salida. En los extremos hay una pantalla de gravas finas que sirve de aquietador del caudal afluente y efluente a la muestra de suelo (Figura 3-1).

El material que se desprende y transporta a lo largo de la experiencia se recibe en un contenedor plástico ubicado al final de la rampa (Figura 2-2 (b)).

El material utilizado corresponde a material traído de la cuenca del Río Coya. Sin embargo, al extraer el material se altera su estado natural y el suelo pierde su estructura, factor relacionando con la capacidad de resistencia del suelo al esfuerzo de corte y con la circulación del agua en suelo, por lo que se debe tener en consideración al momento de analizar los resultados.

3.2 Sistema de control

3.2.1 Granulometría

Para la realización de las experiencias se cuenta con 2 m³ de suelo de la zona de estudio. En cada experiencia se utiliza cerca de 1000 kg del material. La granulometría se realiza, antes de realizar la experiencia, a 2 kg representativos de los 1000 kg de suelo seleccionados. En la Figura 3-3 se observa que el material presenta una granulometría similar en todas las experiencias permitiendo considerar que se trabaja con un mismo tipo de suelo.

El material corresponde a un suelo de grano grueso ya que más del 50% queda retenido en la malla # 200 (0.074 mm), y se clasifica como una arena con pocos finos debido la fracción

fina es menor al 5%. El coeficiente de uniformidad (Cu) es 13.7 y el coeficiente de curvatura (Cc) es 1.8 por lo que el suelo es suelo tipo SW, es decir, una arena bien gradada.

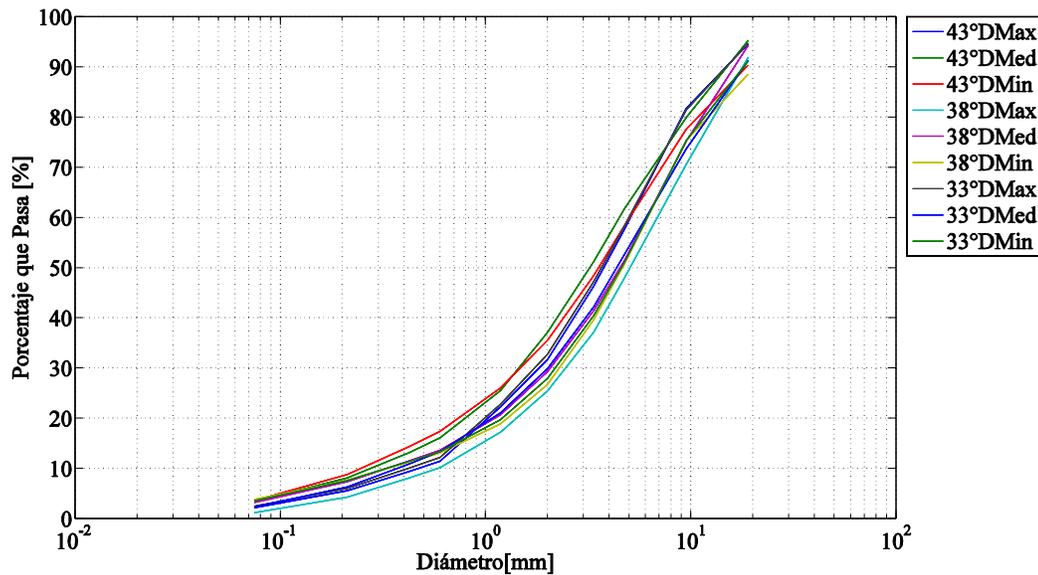


Figura 3-3: Granulometrías.

3.2.2 Humedad

La humedad inicial varía en cada experimento principalmente por dos razones, debido a que el material estuvo expuesto a la humedad ambiental de las distintas estaciones del año, y como consecuencia de la reutilización del material de experiencias anteriores, aun cuando, el material es secado luego de cada experimento. Para conocer la humedad inicial, a partir del quinto experimento, se toma una muestra de 2 kg de suelo antes de realizar la experiencia y se mide la humedad secando la muestra (Tabla 3-1).

Tabla 3-1: Humedad Inicial del Suelo

Pendiente	33°	43°	33°	38°	38°
Densidad	Mínima	Máxima	Media	Media	Máxima
Humedad [%]	6.4	5.6	6.2	4.1	4.8

3.2.3 Contador de agua

El contador de agua se instala a continuación de la válvula de la red de agua potable. Este instrumento mide el volumen en m³ de agua que pasa por la tubería. Para contabilizar el caudal se toman datos cada 10 segundos, 30 segundos y 1 minuto cada vez que se varía el caudal de entrada, este delta tiempo se escoge con el fin de detectar los cambios en el caudal producto de la regulación con la válvula, y cada 5 minutos mientras se mantiene constante el caudal de entrada. La precisión del instrumento es de 0,05 litros. En la Tabla 3-2 se presenta el registro para la experiencia con densidad máxima y pendiente 33°. Se identifican claramente los tres aumentos de caudal realizados antes de lograr la condición de inestabilidad en el talud.

3.2.4 Sensores de presión

Las mediciones de presión de agua tienen como objetivo caracterizar la dinámica de presiones producto del flujo subsuperficial inducido a lo largo del canal. Según la

información facilitada por el fabricante los sensores (Figura 3-4) miden en el rango de 0 a 70 mbar, con una precisión del 0.2%, para temperaturas ambiente entre menos -20°C y $+75^{\circ}\text{C}$. La tensión de alimentación debe ser de 9 a 35 VCC. La señal de salida va desde 4 a 20 mA y el tiempo de respuesta es de 5 ms. El material de la carcasa es de acero inoxidable. La tarjeta de adquisición fue configurada para registrar el voltaje entregado por los sensores cada un segundo.



Figura 3-4: Imagen del Sensor de presión

Para calibrar los sensores, se utiliza una probeta escalada al orden del mm en cuya base se instala el sensor. Se mide el voltaje para diferentes alturas de agua, obteniendo así la curva que se presenta en la Figura 3-5. Al realizar la calibración se constató que los sensores medían presiones hasta máximo 45 mbar, es decir, 45.8 cm.c.a, perdiendo información de la capa superficial del canal, ya que, el canal tiene una profundidad de 58 cm. Debido al apremio del tiempo, se tuvo que trabajar con estos instrumentos. Más aún, una vez realizados los experimentos se observó que en ciertos casos los sensores medían presiones mayores a 45 mbar, por lo que se optó por hacer una calibración específica para cada experiencia comparando la altura del nivel freático con los valores de presión de agua entregada por los sensores y asumiendo una tendencia lineal.

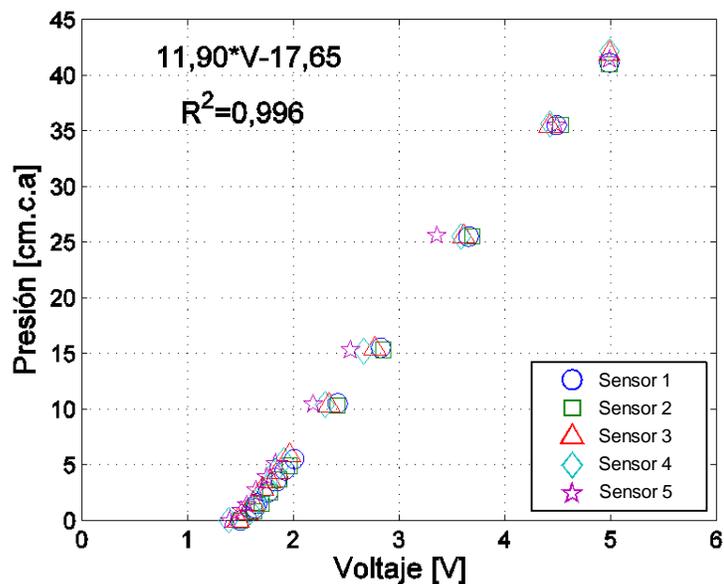


Figura 3-5: Calibración inicial de los sensores de presión. Tendencia lineal y con un coeficiente de correlación $R^2=0.996$.

Los sensores se instalan en la base del canal distribuidos a lo largo del mismo. Con el fin de disminuir el ruido de la red eléctrica se utiliza como fuente de energía una batería.

3.2.5 Cámaras de video

Se utilizan dos cámaras de video, una con vista en planta (superficie del canal) y la otra con vista lateral, abarcando todo el largo del canal (Figura 3-6). Las cámaras son digitales y con una resolución de 1600 pixeles por 1200 pixeles, por lo que cada pixel representa cerca de 1.25 mm. La velocidad de captura es de 25 cuadros por segundo. Ambas cámaras se posicionan ortogonales a la cara del canal que están capturando. La iluminación consta de tres focos que se ubican con el fin de obtener imágenes de alto contraste, que permitan identificar las partículas y evitar las sombras y brillo que ensucian la imagen. Cada cámara entrega un video con la grabación de la experiencia que dura aproximadamente entre 20 y 50 minutos.



Figura 3-6: Cámara Logitech HD Pro

3.3 Metodología

3.3.1 Carga del Material en el Canal

La metodología de carga del material permite reproducir distintas densidades. Para definir el rango de densidades posibles de lograr se realizó una prueba preliminar en un cubo de 15 cm x 15 cm x15 cm. La densidad mínima se determinó al cargar el material en el cubo lentamente por capas y evitando producir fuerzas normales distintas al peso propio. Una vez alcanzado el volumen total del cubo, se determina su masa y se obtiene la densidad mínima. En el caso de la densidad máxima se rellena el cubo en dos capas y cada capa se compacta con ayuda de un pisón. Una vez completado el volumen total del cubo, se determina su masa y se obtiene la densidad máxima. Este ensayo preliminar define el siguiente rango de trabajo:

- Densidad Máxima: 1800 kg/m³
- Densidad Mínima: 1600 kg/m³

A partir de este rango se definen las tres densidades a estudiar, 1600kg/m³, 1700kg/m³ y 1800kg/m³. En cada caso el canal se carga en dos capas, la masa de cada capa se determina a partir de la densidad que se quiere alcanzar y el volumen del canal. Para facilitar la carga del suelo en el canal se cuenta con un teclé eléctrico que eleva los baldes donde se transporta el material (la carga de material se realiza con pendiente cero). En la Tabla 3-2 se presenta

el registro de la masa de suelo cargado en cada experimento. La densidad alcanzada en los experimentos no es exactamente la densidad predefinida, ya que, debido a la magnitud del canal y a que la compactación era manual, no se lograba completar el volumen con el peso exacto requerido. El error asociado a esta condición se encuentra en el rango de -50 kg/m^3 y $+50 \text{ kg/m}^3$ con respecto al valor determinando teóricamente.

Una vez terminada la etapa de carga del material se inclina el canal con ayuda del teclé mecánico. Las pendientes a estudiar se encuentran en el rango observado en la zona de estudio.

Tabla 3-2: Material cargado en cada experimento.

N° Exp	Pendiente	Masa por capa [kg]	Masa Total [kg]	Densidad [kg/m ³]
Exp1	43°	616	1232	1805
Exp 2		580	1160	1699
Exp 3		560	1120	1642
Exp 4	38°	615	1230	1803
Exp 5		579	1158	1698
Exp 6		551	1102	1616
Exp 7	33°	600	1200	1768
Exp 8		575	1150	1695
Exp 9		533	1066	1571

3.3.2 Flujo subsuperficial

El flujo subsuperficial es fundamental en la desencadenación del aluvión, y lo primero es encontrar qué características tiene que presentar este flujo para que se genere el aluvión bajo condiciones controladas. Se realizaron experimentos de prueba para la condición más inestable en relación a la pendiente, es decir, 43°.

Flujo Subsuperficial Paralelo: En los experimentos de prueba se inicia la experiencia con todas las llaves de las tuberías del caudal de salida abiertas y a medida que se eleva el nivel freático, observado a lo largo del canal a través de la pared de acrílico y controlado con los sensores de presión, se van cerrando o reabriendo asegurando un flujo paralelo a la base del canal. El caudal de entrada se aumenta cada vez que se alcanza un flujo subsuperficial estable, es decir, con altura del nivel freático constante y sin observarse falla, ya que implica que el flujo subsuperficial no es suficiente para desestabilizar el suelo. Al aumentar el flujo de entrada, el nivel freático se eleva, sin embargo, tiende a elevarse en cierta zona del canal, ya sea en la zona central o en la zona de aguas abajo. Este aumento localizado del nivel freático rompe la condición de flujo paralelo por lo que se detiene abriendo las llaves de las tuberías de salida. Se observa que al imponer, de esta manera, la condición de flujo paralelo, el nivel freático se eleva en igual medida a lo largo del canal hasta alcanzar el plano superficial. Sin embargo no se observa falla, sino que aparece un flujo superficial (Figura 3-7).

Debido a que se observa ausencia de la falla en los tres experimentos de prueba con las tres densidades en estudio, se propone que para que se genere la falla no solo se requiere un flujo subsuperficial, sino que un aumento localizado de la presión de agua. Este aumento puede ser consecuencia, por ejemplo, de un afloramiento de la capa rocosa, por una disminución localizada de la porosidad del suelo, etc.

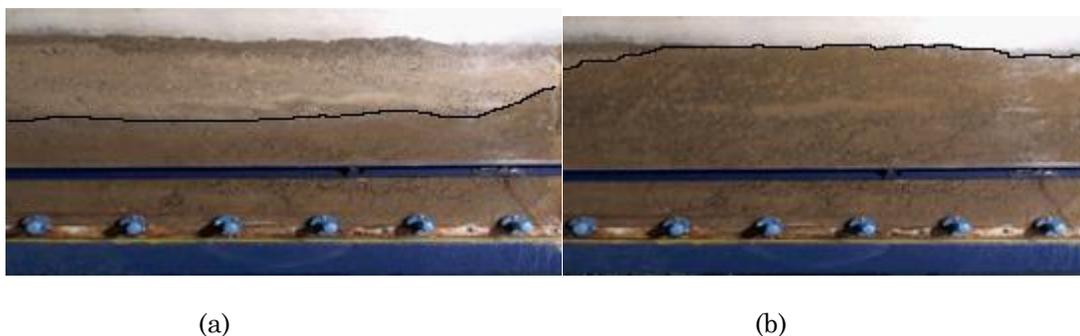


Figura 3-7: Experiencia de prueba con pendiente 43° y densidad máxima, imponiendo flujo paralelo. En (a) el nivel freático a los 8 minutos iniciado el experimento y en (b) el nivel freático a los 20 minutos iniciado el experimento. La línea negra indica la altura del nivel freático.

Flujo Subsuperficial Inicialmente Paralelo: En estos experimentos de prueba la experiencia se inicia con todas las llaves de las tuberías del caudal de salida cerradas y se van abriendo a medida que el flujo llega a la zona de gravas finas de aguas abajo del canal. Al igual que en el caso anterior, el caudal de entrada se va aumentando a medida que el flujo subsuperficial alcanza una condición estable y con el nivel freático constante. Se observa que para cierto aumento del caudal de entrada se genera un flujo vertical en la zona central que se propaga hacia aguas abajo, inclinando el nivel freático y alterando la condición de flujo paralelo. Dependiendo de la densidad de la muestra, cuando este fenómeno alcanza cierta altura se inicia la falla. La masa de la zona superficial se moviliza generando el aluvión.

A partir de la segunda secuencia de experimentos de prueba se define la metodología para generar los aluviones bajo condiciones controladas producto de un flujo subsuperficial.

1. Inicialmente se genera un flujo subsuperficial paralelo a la pendiente.
2. Válvulas de control del caudal de salida inicialmente cerradas, es decir, no drenaje, y únicamente se abren para controlar la condición de borde de aguas abajo, evitando un aumento del nivel freático en esa zona.
3. El caudal de entrada va en aumento a medida que se observa un flujo subsuperficial estable que no desestabiliza el suelo.

3.3.3 Procesamiento de Imágenes

3.3.3.1 Captura y selección de imágenes

La experiencia se registra en videos con vista lateral y en planta. El inicio del experimento está dado por la entrada del caudal al sistema y coincide con el inicio de la toma de datos de los sensores de presión que a su vez, al activarse, enciende dos ampollitas LED visibles para cada cámara. Este mecanismo permite relacionar temporalmente todos los registros (cámaras, sensores y contador de agua). Los videos se convierten en imágenes con el programa VirtualDub. Los videos tienen una duración entre 20 y 50 minutos por lo que para disminuir la cantidad de imágenes se identifica visualmente dos tramos; el primero corresponde a cuando el flujo comienza a ingresar a la muestra generando el flujo subsuperficial paralelo a la pendiente del canal, y el segundo tramo cuando se inicia el flujo vertical y posterior falla. Ambos procesos tienen escalas de tiempo distintas, en la primera etapa se observan variaciones en el orden de los minutos mientras que en la segunda etapa del orden de los segundos. Es por esto que en la primera etapa se analizan imágenes cada 5 o 10 minutos, dependiendo del caso, y para la segunda etapa se rescatan imágenes cada

segundo. Todas las imágenes laterales y en planta se recortan seleccionando la zona de interés para el posterior análisis (Figura 3-8).

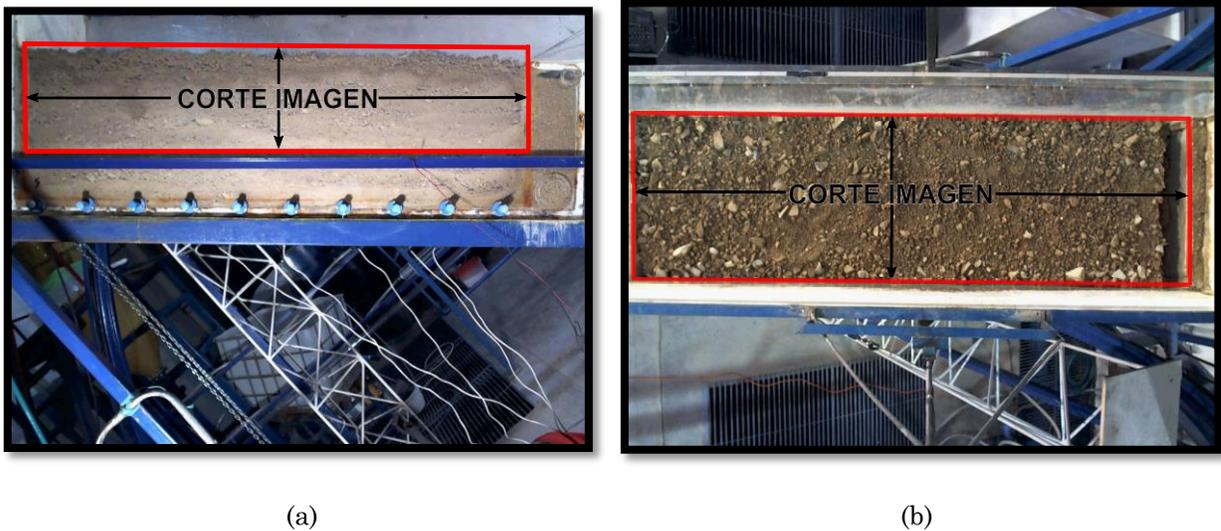


Figura 3-8: En (a) en rojo se delimita la zona analizada de la imagen capturada con la cámara con vista en lateral. En (b) también en rojo se delimita la zona analizada de la imagen capturada con la cámara con vista en planta del canal.

3.3.3.2 *Análisis de Imágenes*

El procesamiento de imágenes se realiza mediante el método de Particle Image Velocimetry (PIV), que se basa en algoritmos de correlación de secuencias de imágenes (PIV, Adrian 1991). Como resultado de este proceso se generan campos de velocidad que permitirán estudiar el inicio del movimiento de las partículas. El input del método es una secuencia de imágenes capturadas cada cierto intervalo de tiempo conocido. En este caso, las imágenes presentan alta densidad de partículas por lo que se analizan subventanas dentro de la imagen, denominadas ventanas de interrogación. Para este análisis se utilizan las siguientes ventanas de interrogación 64pxX64px, 32pxX32px, 16pxX16px y 8pxX8px. La resolución de la imagen se escogió tal que un pixel corresponda aproximadamente a un milímetro con el fin de registrar las partículas más pequeñas, excluyendo la fracción fina (de diámetro menor a un milímetro) ya que representa menos del 5% de la muestra.

El método se aplica con una rutina gratuita para Matlab llamado PIV_lab desarrollada por William Thielicke y. Eize J. Stamhuis (2005) que entrega los resultados en archivos.mat.

3.3.3.3 *Presentación de Resultados*

El análisis del inicio de la falla en la muestra de suelo se realiza por medio de 5 perfiles transversales distribuidos a lo largo del canal en la cara lateral y 5 perfiles transversales distribuidos a lo largo del canal en la cara superficial, cuyas posiciones quedan determinadas por la ubicación de los cinco sensores de presión (Figura 3-9). Así, para cada zona se conocerá las velocidades promedio laterales y superficiales, la presión de agua en el fondo y la altura del nivel freático a lo largo del tiempo. Cabe mencionar que se supone que la velocidad observada a través de la cara lateral del canal es representativa de lo que sucede en todo el ancho. A su vez, la presión de agua registrada por el sensor de presión es puntual pero se considera representativa de todo el ancho del canal.

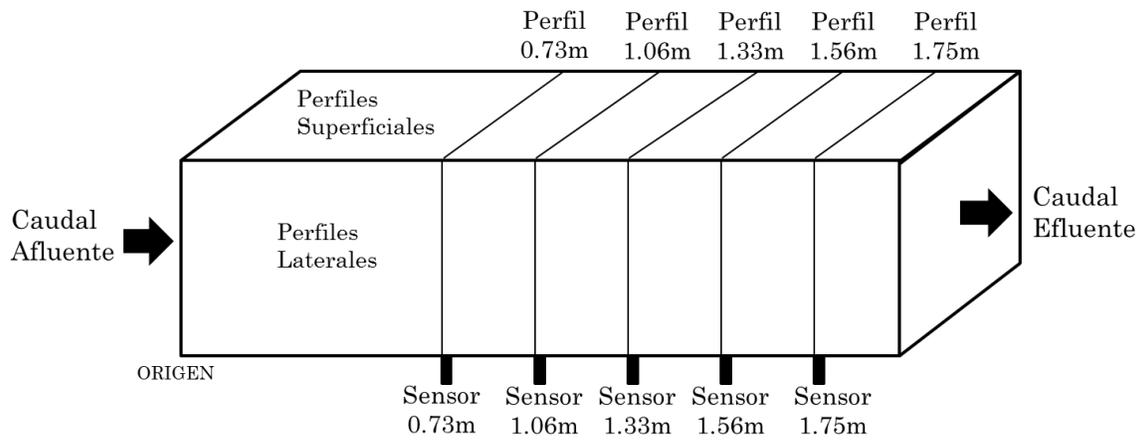


Figura 3-9: Esquema de la del canal indicando los perfiles de velocidad analizados y la posición de los sensores a lo largo del canal.

Capítulo 4

Procesamiento de datos y Presentación de Resultados

Los resultados que se presentan a continuación describen los aluviones generados bajo condiciones controladas mostrando el registro de las variables medidas, todo esto con el fin de identificar la o las variables con mayor relevancia en la inestabilidad de la ladera.

4.1 Presión y velocidades en el inicio del movimiento

Las figuras siguientes (Figura 4-1 a Figura 4-9) están compuestas por tres gráficos, el primero muestra el registro de la presión de agua en la base del canal versus el tiempo de experimentación, el segundo, la velocidad promedio lateral versus el tiempo de experimentación, y, el tercero, la velocidad promedio superficial versus el tiempo de experimentación, ambas velocidades corresponden a la velocidad promedio del perfil transversal de velocidades coincidente con la ubicación del sensor de presión. Los experimentos tardan, en el caso de densidad mínima, entre 20 y 32 minutos, en densidad media, entre 23 y 33 minutos y en densidad máxima entre 19 y 22 minutos, antes que ocurra la falla. Por esto, para describir en detalle el periodo de mayor relevancia, es decir, cuando comienza el movimiento que origina la posterior falla, se dividen los gráficos en dos escalas de tiempo, identificando el cambio de escala con una línea negra. La primera escala es del orden de los minutos y corresponde al periodo en que ingresa el agua al canal y comienza a elevarse el nivel freático. La segunda escala de tiempo es del orden de los segundos, y describe el inicio del movimiento de las partículas hasta la falla propiamente tal.

4.1.1.1 Densidad mínima y pendiente 33°, 38° y 43°

Las Figuras 4-1, 4-2 y 4-3 corresponden a los experimentos realizados con densidad mínima y pendiente 33°, 38° y 43° respectivamente.

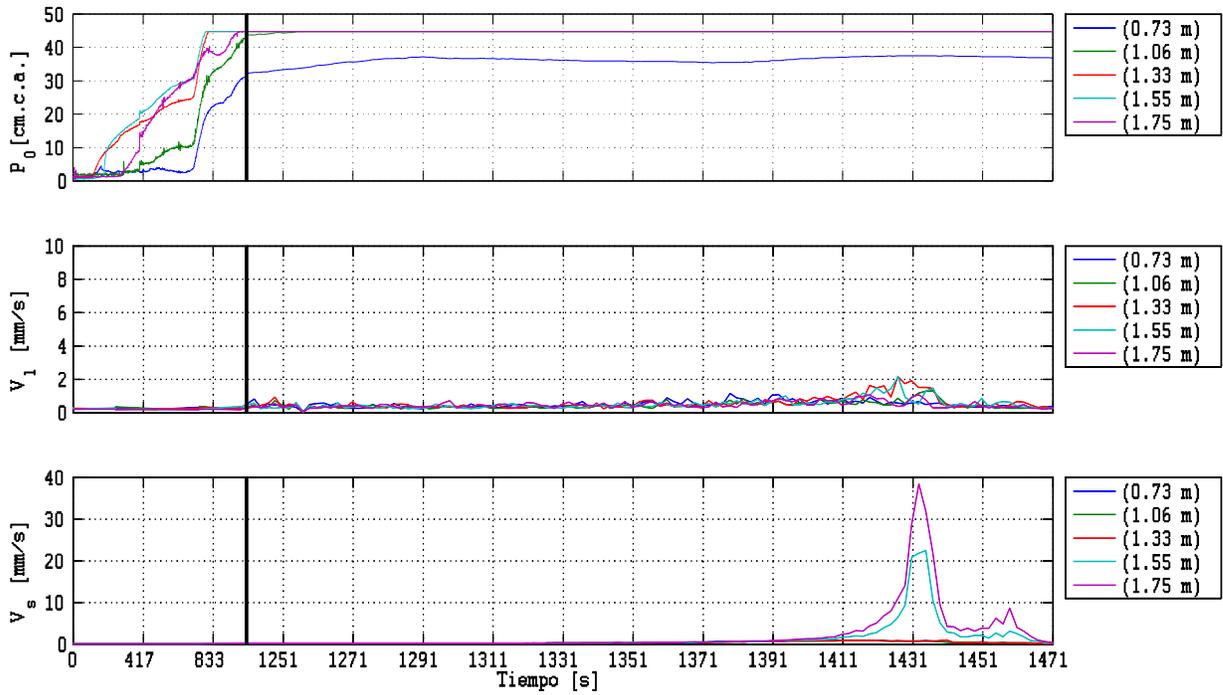


Figura 4-1: Caso pendiente 33° y densidad mínima.

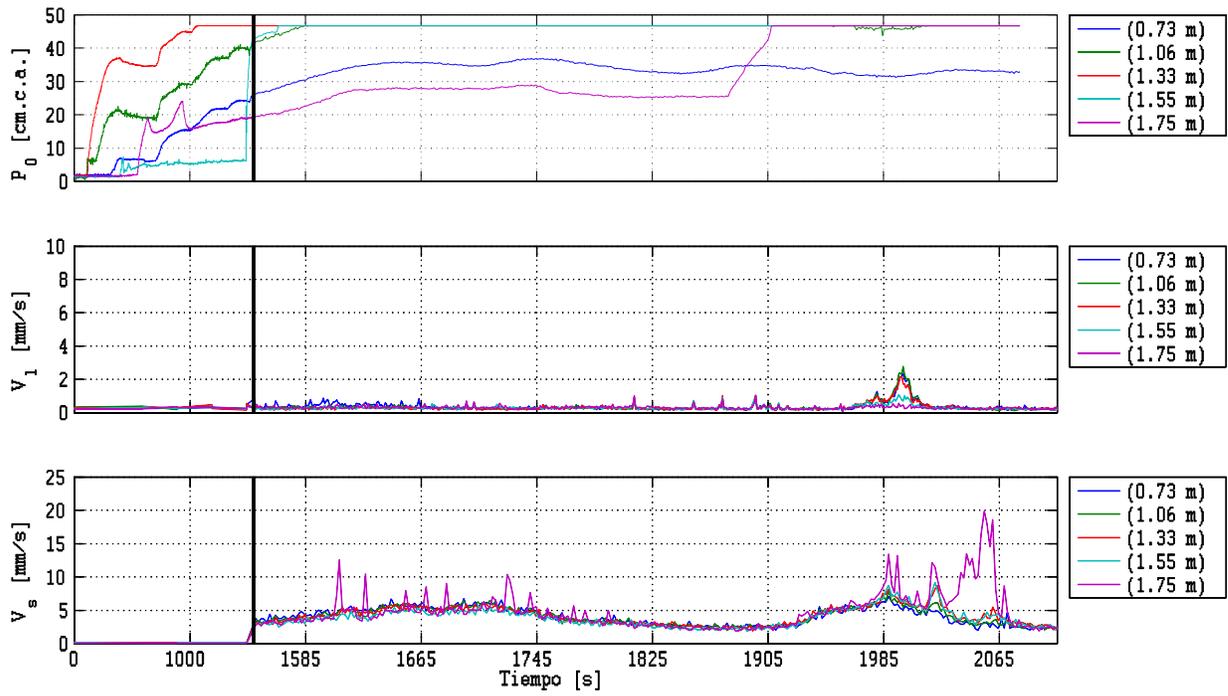


Figura 4-2: Caso pendiente 38° y densidad mínima.

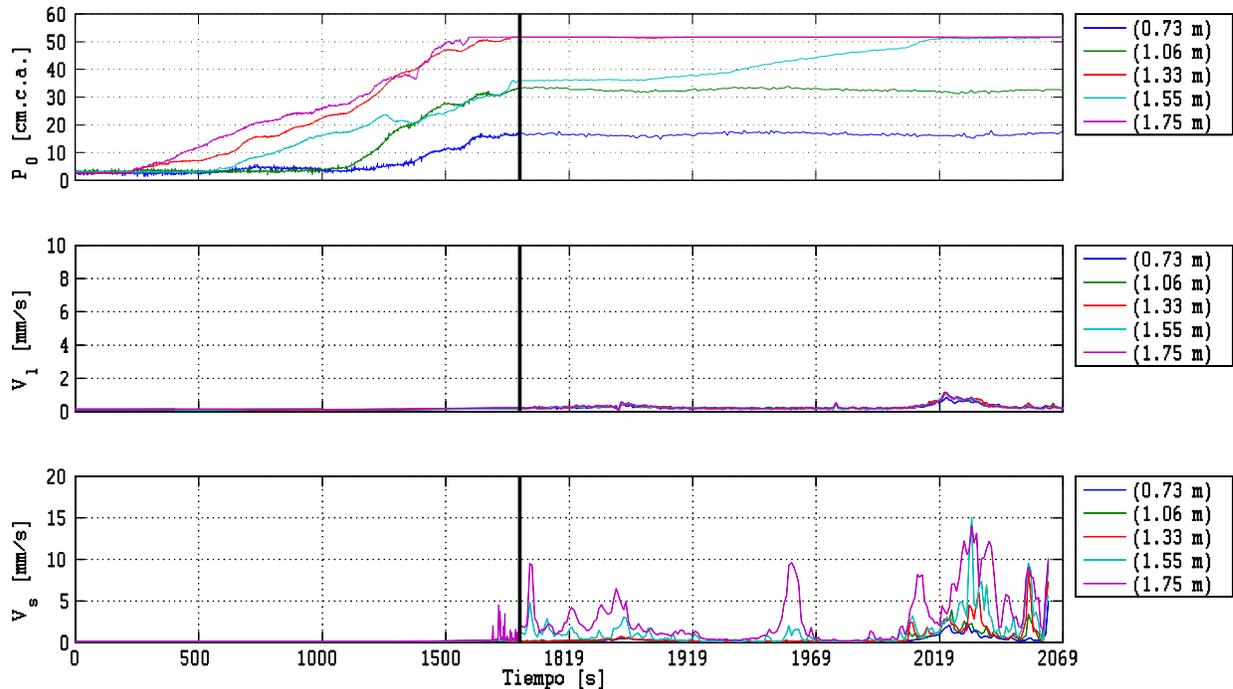


Figura 4-3: Caso pendiente 43° y densidad mínima.

Al comparar los datos de las tres experiencias se rescatan ciertas similitudes tanto en el comportamiento de la presión de agua como en las velocidades laterales y superficiales. En el gráfico de la presión de agua se aprecia, en los tres casos, un aumento de la presión desde el inicio del experimento. En ciertas zonas se alcanzan la altura límite de medición pasados los 1000 s. En pendiente 33° y 38°, a 73 cm desde el borde de agua arriba del canal y en pendiente 43° a 73 cm y 106 cm, la presión es menor a este límite y alcanza un valor máximo a partir del cual se mantiene relativamente constante. En pendiente 33° se alcanza este máximo a los 1000 s aproximadamente, en pendiente 38° a los 1600 s y en pendiente 43° a los 1850 s. En los tres casos el perfil de aguas arriba, ubicado a 73 cm del origen del canal, presenta la menor presión máxima. Cabe notar que a mayor pendiente la presión de agua, en general, alcanza valores máximos menores, y, a su vez, estos se alcanzan a mayor tiempo desde el inicio del experimento.

En los tres casos, durante la experimentación, se observó un movimiento anterior a la falla. Este movimiento se puede asociar al primer aumento en las velocidades que se aprecia en los gráficos de velocidad superficial, donde la velocidad promedio alcanza 1 mm/s en pendiente 33° y alrededor de 5 mm/s en pendiente 38° y pendiente 43°. Este aumento de las velocidades coincide con el momento en que los puntos nombrados anteriormente alcanzan la presión máxima, sin embargo, no es concluyente, debido a que el error de la técnica experimental es de orden de magnitud cercano al valor detectado en pendiente 33°. Este error, se considera igual a la velocidad detectada por la técnica en el instante inicial cuando el material se encuentra en reposo, y tiene un valor cercano a los 0,2 mm/s.

Luego, en pendiente 38° y 43°, se observa que la presión de agua aumenta en una zona mientras el resto permanece constante, esto, considerando las zonas donde los sensores no han alcanzado el máximo medible. En el caso de pendiente 38°, es a 175 cm del origen del canal y en pendiente 43°, a 155 cm del origen del canal. Este aumento de presión precede a la formación de la falla e inicio del movimiento.

La falla se identifica con un crecimiento significativo de la velocidad promedio lateral y superficial, la velocidad lateral presenta máximos entre 1,5 mm/s a 2 mm/s, dependiendo de la condición de pendiente. La velocidad superficial alcanza máximos entre 15 mm/s y 40 mm/s. La falla, según los gráficos de velocidad, es un movimiento localizado que dura alrededor de 60 s y tiene una velocidad máxima instantánea. Tanto en pendiente 38° como en pendiente 43° la zona que presenta un aumento de presión precedente a la falla también presenta altas velocidades en el momento de la falla. Se observa que en las experiencias en que la extensión de la falla es mayor, la magnitud de la velocidad es menor. Esto se relaciona con que mientras mayor sea la extensión de la falla un volumen mayor de material está en movimiento y, se observa, que mientras menor es el volumen de masa en movimiento mayor son las velocidades. A medida que aumenta la pendiente la falla tarda más tiempo en ocurrir. En pendiente 33° ocurre a los 1400 s, a los 1900 s en pendiente 38° y a los 2000 s en pendiente 43°.

4.1.1.2 Densidad media y pendiente 33°, 38°, 43°.

Las Figuras 4-4, 4-5 y 4-6 corresponden a los experimentos realizados con densidad media y pendiente 33°, 38 y 43° respectivamente.

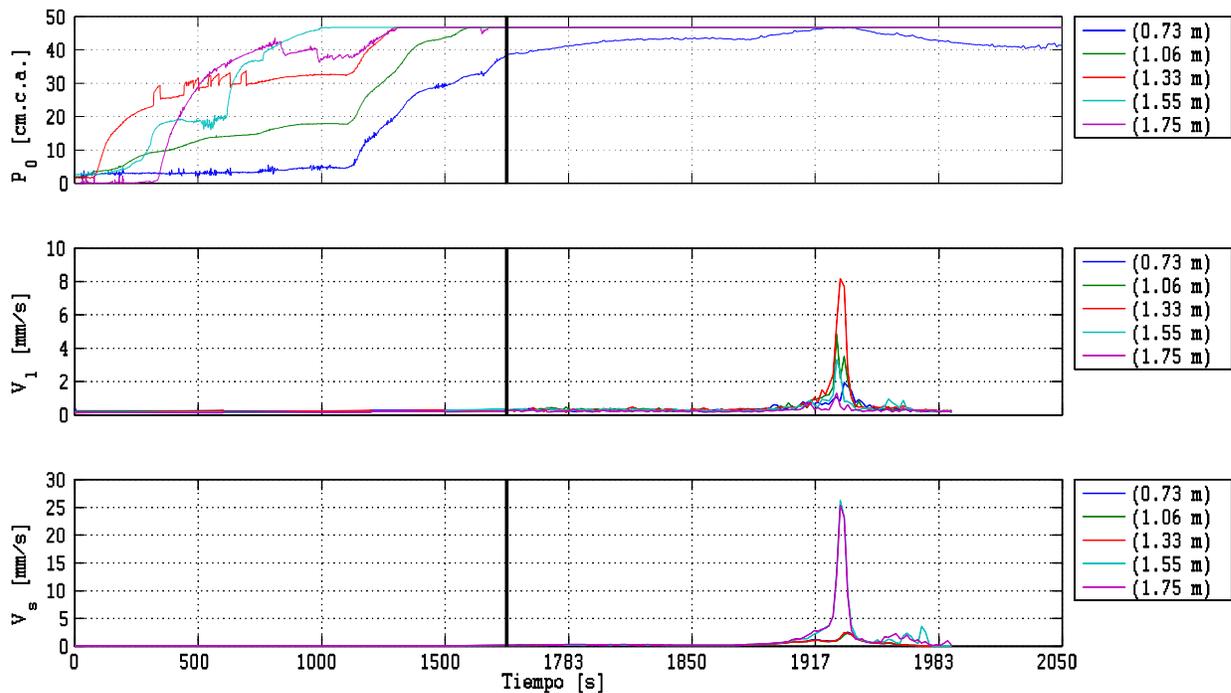


Figura 4-4: Caso pendiente 33° y densidad media.

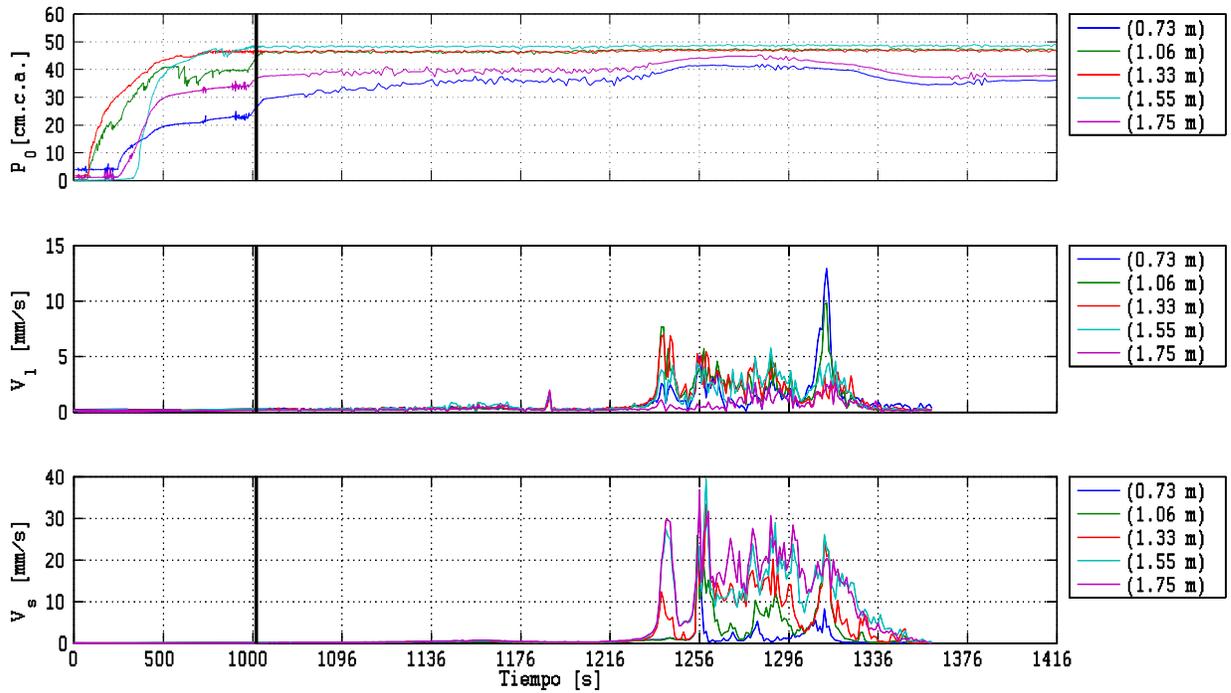


Figura 4-5: Caso pendiente 38° y densidad media.

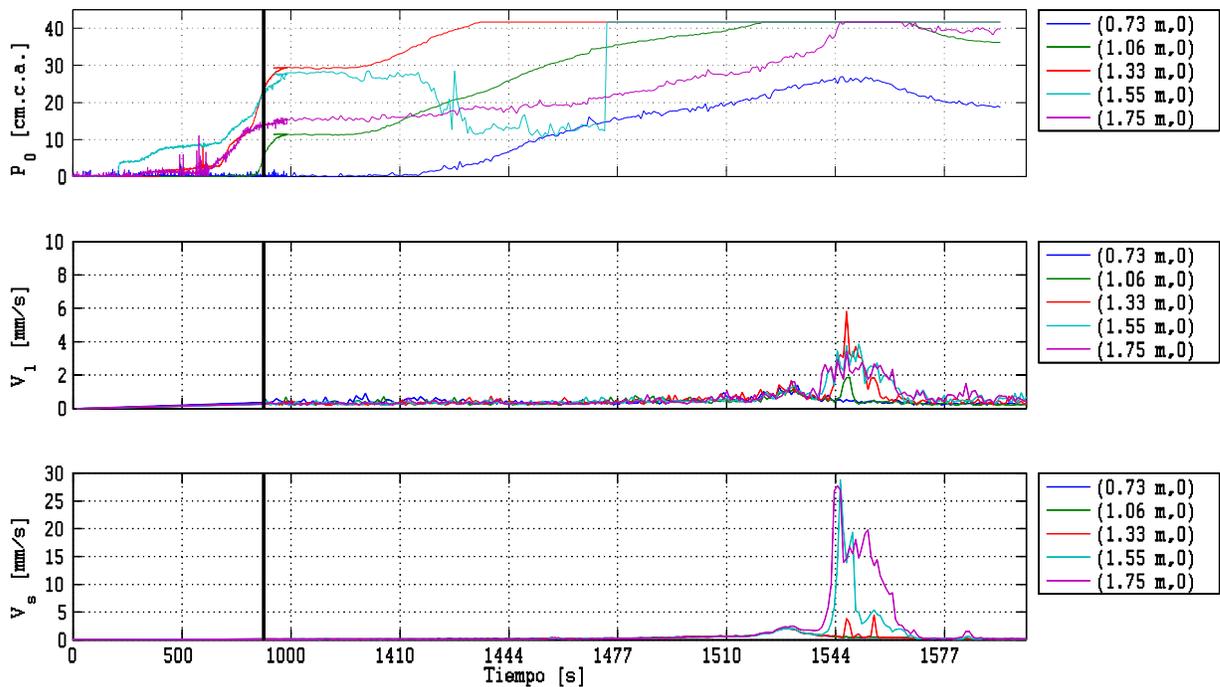


Figura 4-6: Caso pendiente 43° y densidad media.

Los tres gráficos de presión de agua, bajo las distintas condiciones de pendiente, muestran que la presión aumenta desde el inicio del experimento, es decir, desde que se comienza a

inyectar el flujo subsuperficial. Pasados los 1000 s de la experiencia, ciertos puntos alcanzan la presión máxima medible. Se observa que a menor pendiente las presiones son mayores, por lo que en pendiente mínima un mayor número de sensores alcanzan el límite máximo de medición. En los tres casos la zona que presenta menor presión es a 73 cm del origen del canal. El aumento en la presión continúa hasta que ocurre la falla, momento en que alcanza un valor máximo el que, una vez iniciada la falla, comienza a disminuir.

La falla tiene una duración de 30 s aproximadamente en pendiente 33°, 80 s en pendiente 38° y 50 s en pendiente 43°. La formación de la falla se identifica por un aumento de las velocidades promedio laterales y superficiales, siendo mayores las velocidades superficiales cuyos valores bordean los 40 mm/s en pendiente 38° y los 25 mm/s en pendiente 33° y en pendiente 43°. En pendiente 33° la falla ocurre a los 1900 s, en pendiente 38° a los 1200 s y en pendiente 43° a los 1500 s. En pendiente 33° sólo se detecta movimiento en la zona de aguas abajo, mientras que en pendiente 38° y 43° la falla es más extensa.

Una vez ocurrida la falla, y desencadenado la remoción del material, se observa una disminución en las presiones de agua. En pendiente 33° esta disminución se aprecia en el punto que se encuentra a 73 cm del borde de aguas arriba del canal, en pendiente 38° en los puntos que están a 73 cm y a 175 cm del canal y en pendiente 43° en los puntos que están a 73 cm, 106 cm y a 175 cm. En todos los casos, en el resto de las zonas de medición, las presión se encuentra por sobre el límite máximo admisible por los sensores.

4.1.1.3 Suelo denso y pendiente 33°, 38° y 43°.

Las Figuras 4-7, 4-8 y 4-9 corresponden a los experimentos realizados con densidad máxima y pendiente 33°, 38 y 43° respectivamente. La Figura 4-7 no tiene el gráfico de velocidad superficial producto de que el archivo de video se guardó dañado y no se pudo recuperar.

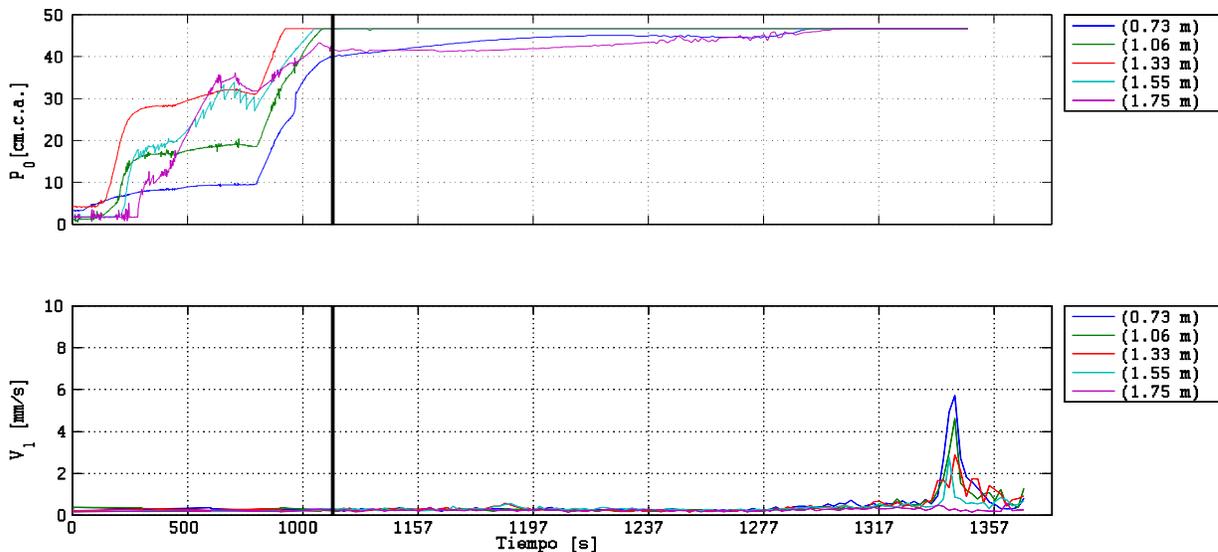


Figura 4-7: Caso pendiente 33° y densidad máxima.

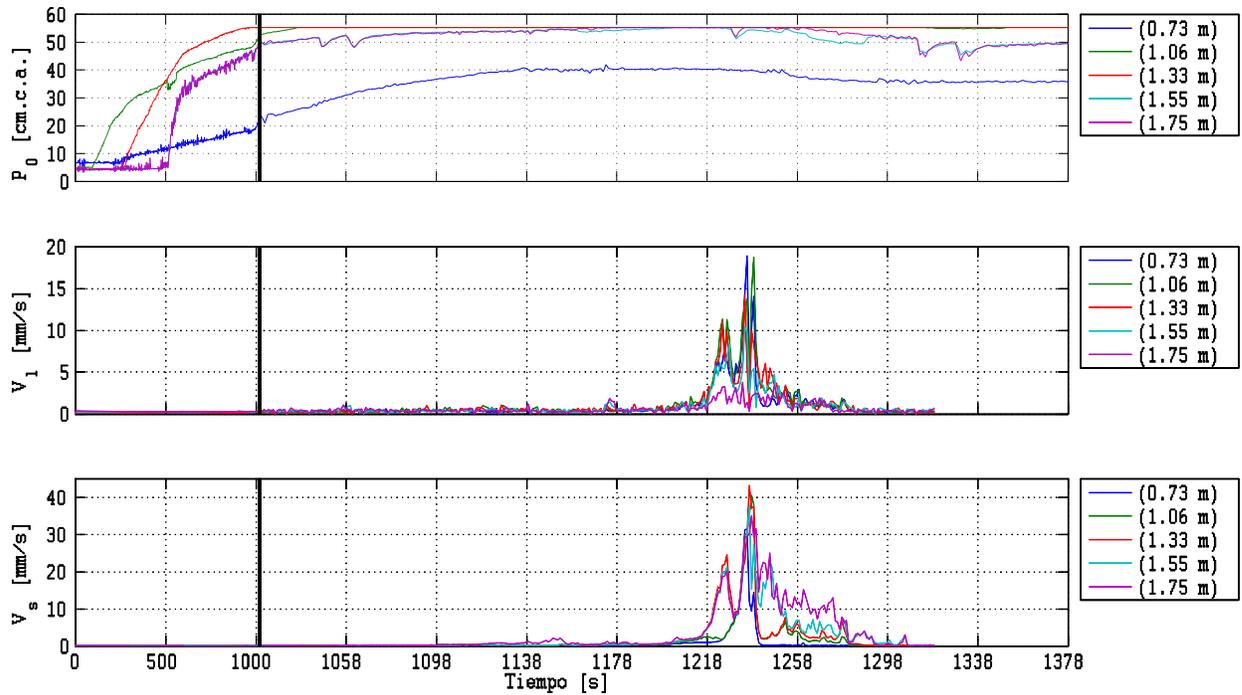


Figura 4-8: Caso pendiente 38° y densidad máxima.

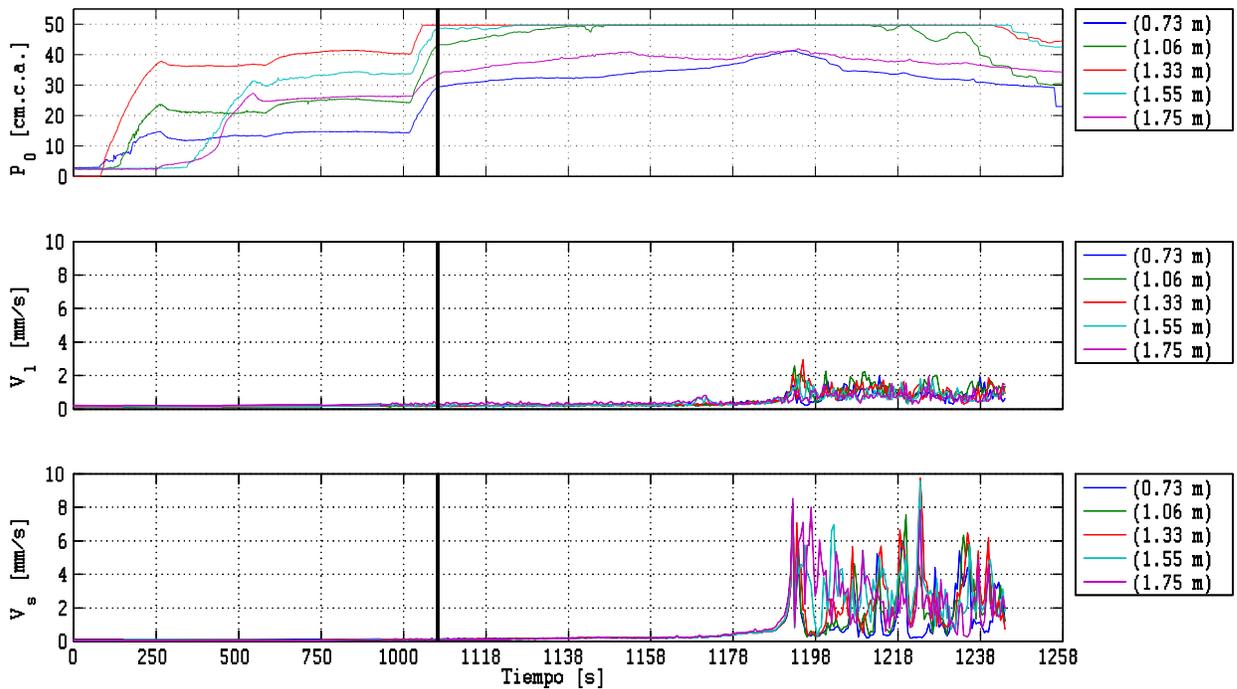


Figura 4-9: Caso pendiente 43° y densidad máxima.

Bajo las tres condiciones de pendiente, la presión de agua va en aumento desde que se inicia la experiencia. Pasados los 1000 s, ciertos puntos de medición alcanzan valores mayores al rango de medición de los sensores, en pendiente 33° y 43° el límite es a los 50 cm.c.a y en

pendiente 38° a los 55 cm.c.a. Mientras menor es la pendiente un mayor número de puntos de medición alcanzan este límite debido a que se observan mayores presiones en menor tiempo. En los tres casos el punto de medición que se encuentra más cercano al origen del canal es el que tiene menor presión. En las zonas donde se tiene registro de la presión durante todo el experimento, es de decir, a 73 cm de origen del canal y a 1.75 cm del origen del canal, se observa que la presión aumenta hasta alcanzar un máximo cuyo valor en pendiente 33° es de 45 cm.c.a. y, en pendiente 38° y 43° es de 40 cm.c.a. En el caso de pendiente 33° este máximo alcanza el límite medible y no disminuye hasta el final del experimento. En el caso de pendiente 38° y 43°, el instante en que se alcanza esta presión máxima coincide con el inicio del movimiento y más aún, con las velocidades máximas.

La formación de la falla y el inicio del movimiento se identifican por un aumento de la velocidad promedio lateral y superficial. En relación a la velocidad obtenida desde la vista lateral en pendiente 33°, el perfil ubicado a 1.75 cm del origen del canal, no presenta movimiento y mantiene su velocidad constante a lo largo de toda la experiencia, los otros cuatro perfiles aumentan su velocidad en distintas magnitudes siendo el máximo cercano a los 6 mm/s. La falla dura alrededor de 20 s. En pendiente 38° todas las zonas presentan un aumento de velocidad pero de diferentes magnitudes, siendo el máximo cercano a los 20 mm/. La falla dura 40s aproximadamente. En estos dos casos la falla es localizada alcanzando un máximo instantáneo. En pendiente 43° todas las zonas de medición muestran un aumentan en la velocidad alcanzando magnitudes similares y cercanas a los 3 mm/s. A diferencia de los casos anteriores, este máximo se alcanza en varios instantes durante un tiempo prolongado (mayor a los 60 segundos). En pendiente 33° la falla ocurre a los 1320 s, en pendiente 38° a los 1210 s y en pendiente 43° a los 1180 s. Una vez alcanzada las velocidades máximas, en pendiente 38° y 43°, la presión comienza a disminuir y, en pendiente 33°, todos los puntos presentan valores mayores al máximo admisible por los sensores.

4.2 Ejemplo del análisis de velocidades en un aluvión generado bajo condiciones controladas

La siguiente secuencia de imágenes, que incluye desde la Figura 4-10 hasta la figura 4-19, grafica los resultados entregados por el análisis de imágenes mediante PIV bajo las condiciones de pendiente 38° y densidad máxima. Para cada instante de tiempo se cuenta con cuatro imágenes. Las de la izquierda corresponden a la magnitud de la velocidad y las de la derecha presentan los vectores de velocidad. Las imágenes superiores resultan del análisis realizado a partir de la tomas desde la vista en planta y las dos inferiores del análisis de las imágenes capturadas desde la vista lateral del canal. Cabe notar que el orden de magnitud de las velocidades laterales y superficiales es diferente por lo que las escalas de colores representan distintas magnitudes en cada caso. Las imágenes seleccionadas describen desde que inicia el movimiento, la formación de la falla y la posterior remoción del material. En todas las imágenes, el flujo subsuperficial, escurre de izquierda a derecha, es decir, el caudal afluente ingresa por la izquierda y el caudal efluente sale por la derecha.

La Figura 4-10, muestra la condición del suelo instantes antes a la formación de la falla. Se observa que el nivel freático está inclinado y que aguas abajo de la muestra ha alcanzado el nivel superficial generado un pequeño caudal superficial por los costados de la muestra. Las velocidades, tanto superficiales como laterales, son mínimas (menores a 2 mm/s).

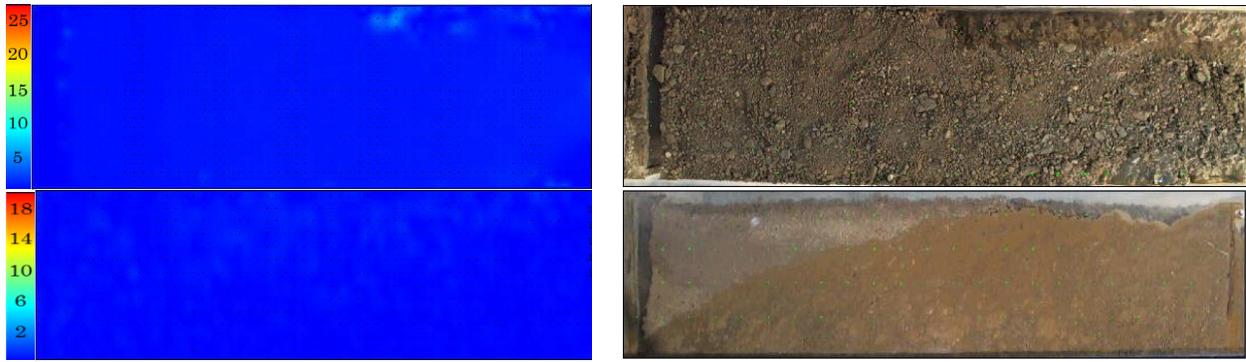


Figura 4-10: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1199 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

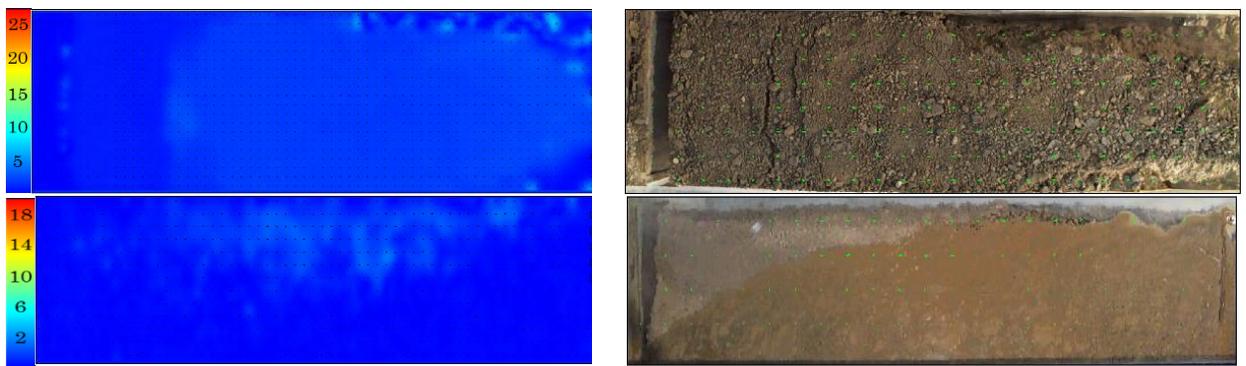


Figura 4-11: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1214 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

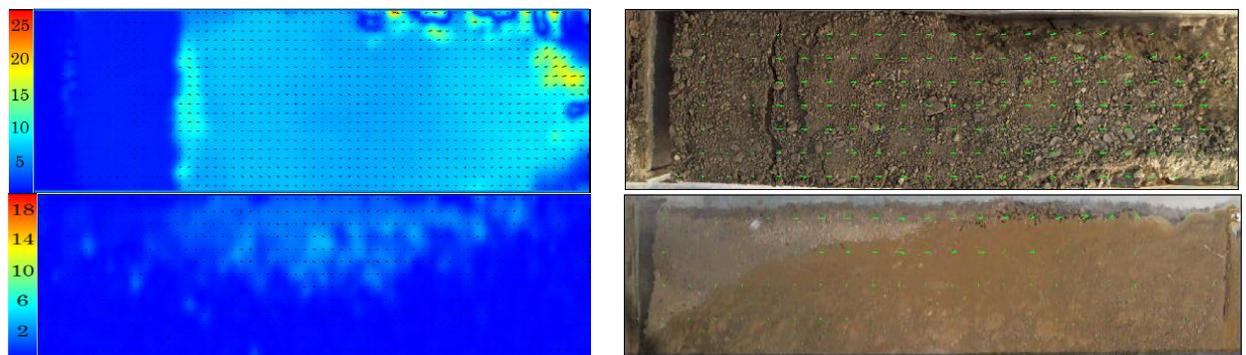


Figura 4-12: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1217 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

La formación de la falla inicia con una grieta transversal (Figura 4-11), de todo el ancho de la muestra, que se observa desde la vista en planta, y que se ubica en la zona de aguas arriba de la muestra. La velocidades superficiales de la zona aguas abajo de la grieta aumentan alcanzando valores cercanos a los 5 mm/s. Se observa también, un aumento de la velocidad lateral en la zona superior de aguas abajo de la grieta superficial, este aumento de velocidad presenta profundidades mayores en la zona central de la zona en movimiento. El

nivel freático presenta un pequeño aumento en la zona aguas arriba del canal en comparación a lo observado en la Figura 4-10.

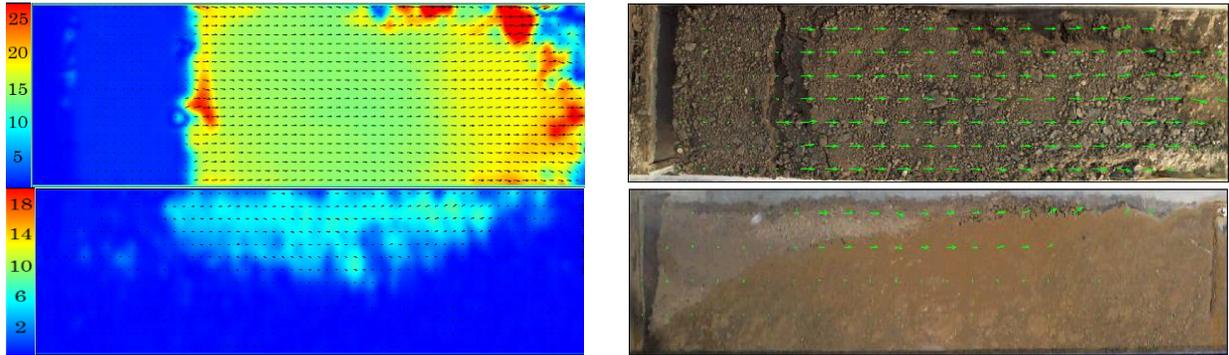


Figura 4-13: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1221 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

En las Figuras 4-12 y 4-13 el proceso de formación la falla continúa. Esto se detecta en el aumento de las velocidades tanto laterales como superficiales de la zona en movimiento. Desde la vista en planta se observa el aumento del grosor de la grieta inicial. En la Figura 4-13 y 4-14 es posible determinar el área de falla desde la vista lateral y desde la vista en planta. La falla se presenta como un movimiento en masa donde todo el volumen presenta velocidades similares. No se observan cambios en el nivel freático.

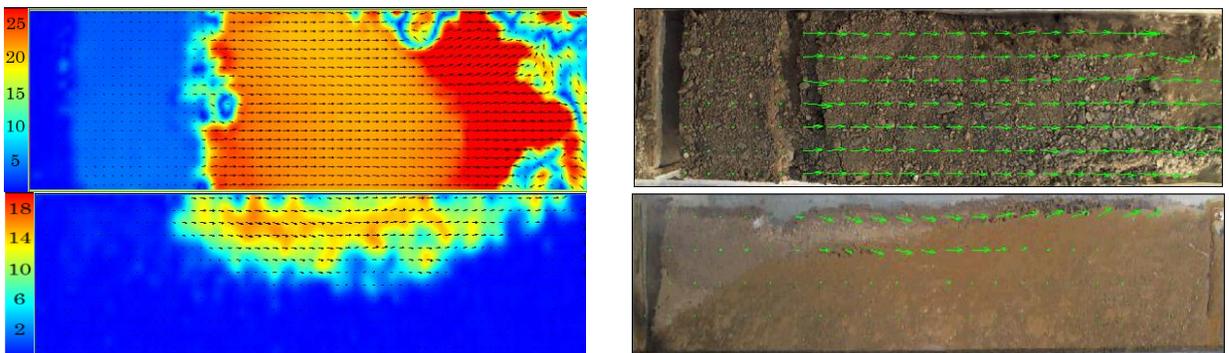


Figura 4-14: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1224 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

Luego, la falla inicial se propaga hacia la zona de aguas arriba de la muestra, donde se detecta un aumento en la velocidad. (Figura 4-14 y Figura 4-15). A medida que aumentan las velocidades en esta nueva zona en movimiento, las velocidades de la zona inicial de falla disminuyen, hasta alcanzar una velocidad igual en toda la zona en movimiento (Figura 4-16), generándose un segundo movimiento en masa pero que abarca toda el área superficial y una mayor profundidad, es decir, desplaza un volumen mayor de material. Este segundo proceso alcanza velocidades superficiales y laterales cercanas a los 25 mm/s (Figura 4-18).

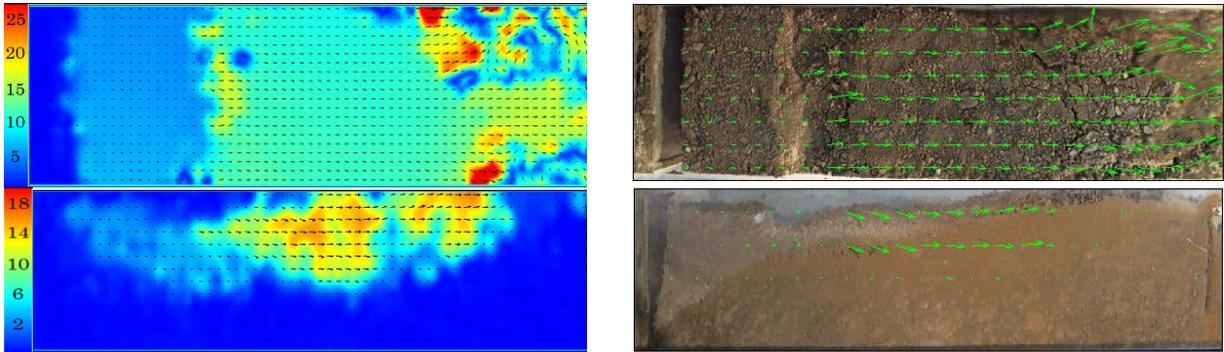


Figura 4-15: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1229 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

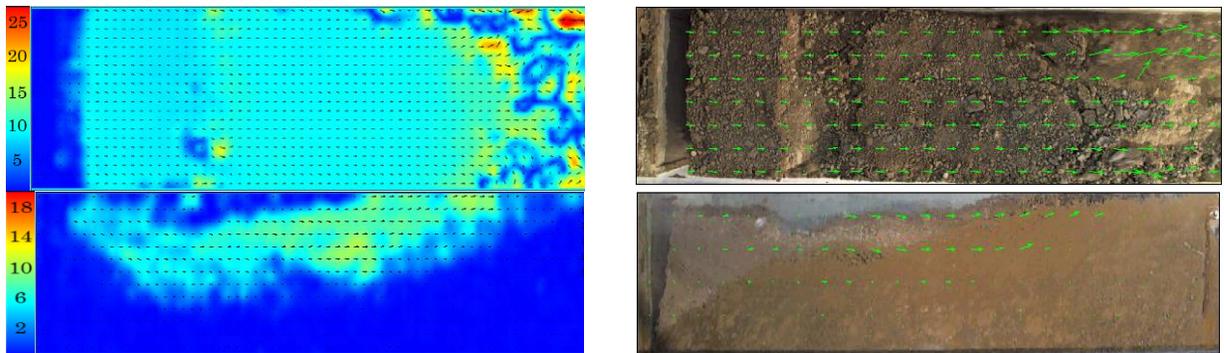


Figura 4-16: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1231 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

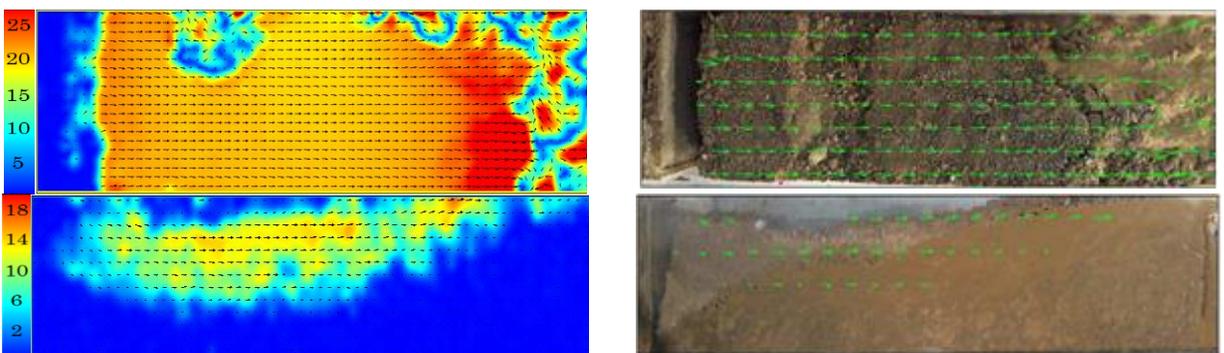


Figura 4-17: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1234 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

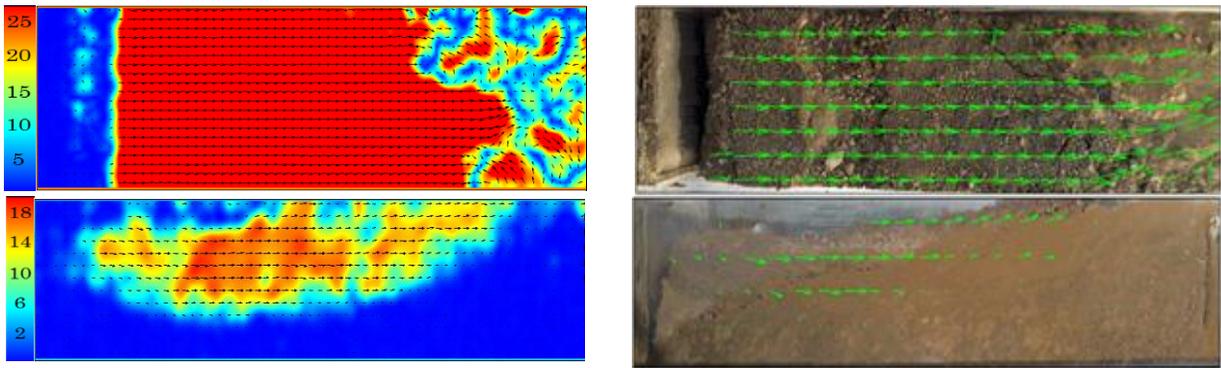


Figura 4-18: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1236 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

La Figura 4-19 muestra la condición del suelo luego de haber ocurrido la falla y posterior transporte del material por la rampa. Existen pequeñas zonas que aun presentan movimiento debido, principalmente, a la presencia de un flujo superficial.

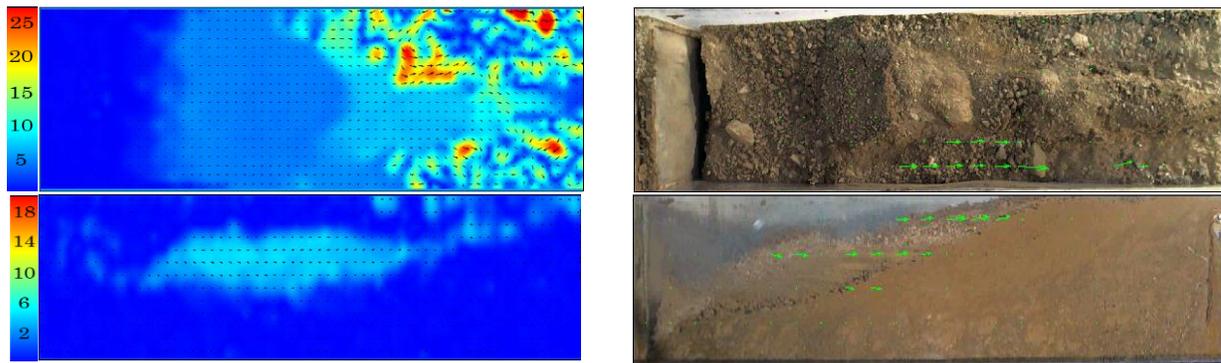


Figura 4-19: Pendiente 38° y densidad máxima del suelo a los **1255 segundos** desde el inicio de la experiencia. Magnitud de la velocidad en mm/s.

4.3 Cálculo de los parámetros característicos de las fallas observadas

El registro del punto anterior, además de detectar las velocidades en la muestra de suelo, permite definir la altura del nivel freático en cada instante, la profundidad de la falla a lo largo del canal y el volumen de material removido producto de la falla, información fundamental para el análisis que se desarrollará en el siguiente capítulo.

En la Figura 4-20 se ejemplifica la metodología utilizada para el cálculo de la profundidad de la falla (h_f), altura del nivel freático sobre la superficie de falla en el instante de la falla ($h_{N.F.}$) y la diferencia entre la altura inicial del suelo y la altura luego de ocurrir la remoción del material (h_r). Se definen cinco puntos a lo largo de la zona de falla en los cuales se realizan las mediciones. Estos puntos se denominan h_1 , h_2 , h_3 , h_4 y h_5 . La altura de remoción total se mide en la condición final de la muestra, por lo que la altura de remoción

que se observa en la imagen corresponde a la deformación que presenta la muestra en el instante de la falla.

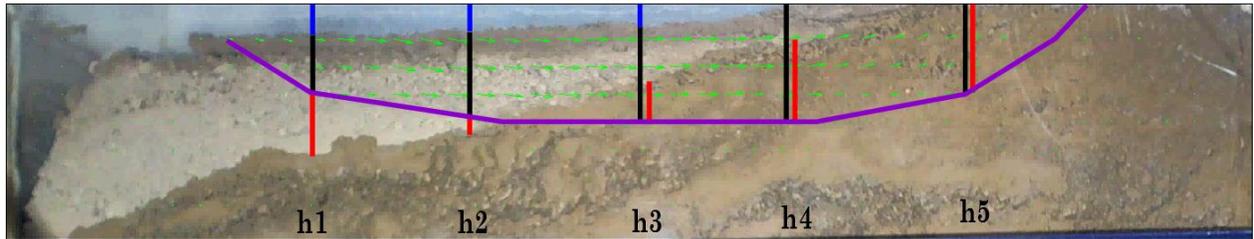


Figura 4-20: Caso pendiente 38° y densidad mínima. En rojo la altura del nivel freático con respecto a la superficie de falla ($h_{N.F.}$), en negro la altura de la falla (h_f), en azul la altura del volumen de material removido (h_r) y en morado la superficie de falla.

Para cada condición de pendiente y densidad del suelo se miden las alturas en los cinco puntos. Los valores obtenidos se presentan en tres tablas (Tabla 4.1, 4.2 y 4.3), cada tabla contiene los valores de altura medidos para las tres experiencias realizadas con la misma pendiente.

Tabla 4-1: Altura de falla, altura de remoción y altura del nivel freático en la falla para pendiente 43° y densidad mínima, media y máxima.

	PENDIENTE 43°								
	Densidad Mínima			Densidad Media			Densidad Máxima		
	h_f [cm]	h_r [cm]	$h_{N.F.}$ [cm]	h_f [cm]	h_r [cm]	$h_{N.F.}$ [cm]	h_f [cm]	h_r [cm]	$h_{N.F.}$ [cm]
h1	15.1	12.2	-13.6	13.5	9.7	-1.9	9.8	37.0	-11.7
h2	19.8	10.9	-5.4	20.5	13.2	9.9	7.5	37.0	-9.6
h3	25.9	8.8	2.9	15.6	18.2	7.3	20.5	23.4	8.8
h4	21.6	2.1	3.9	11.5	11.9	7.5	17.4	12.4	14.9
h5	8.4	0.0	1.5	7.7	7.1	2.7	9.1	3.4	4.2

Tabla 4-2: Altura de falla, altura de remoción y altura del nivel freático en la falla para pendiente 38° y densidad mínima, media y máxima.

	PENDIENTE 38°								
	Densidad Mínima			Densidad Media			Densidad Máxima		
	h_f [cm]	h_r [cm]	$h_{N.F.}$ [cm]	h_f [cm]	h_r [cm]	$h_{N.F.}$ [cm]	h_f [cm]	h_r [cm]	$h_{N.F.}$ [cm]
h1	11.4	8.6	-11.6	8.4	15.8	-9.9	10.1	19.6	1.5
h2	17.9	7.1	-1.5	13.4	12.7	4.8	11.8	17.4	7.2
h3	21.9	4.6	9.8	15.8	6.1	17.3	15.4	13.9	12.3
h4	16.1	2.0	12.6	11.9	3.6	15.4	9.4	10.2	7.1
h5	6.5	0.0	5.6	6.4	0.0	10.8	4.0	5.2	4.0

Tabla 4-3: Altura de falla, altura de remoción y altura del nivel freático en la falla para pendiente 33° y densidad mínima, media y máxima.

	PENDIENTE 33°								
	Densidad Mínima			Densidad Media			Densidad Máxima		
	hf [cm]	hr [cm]	h _{N.F.} [cm]	hf [cm]	hr [cm]	h _{N.F.} [cm]	hf [cm]	hr [cm]	h _{N.F.} [cm]
h1	12.5	5.7	-15.6	9.7	4.8	-0.9	8.7	6.1	-5.4
h2	18.7	5.8	-3.1	13.9	8.8	8.6	14.3	6.4	4.3
h3	25.9	4.6	7.9	16.5	6.0	12.8	14.5	12.4	7.9
h4	16.4	8.9	8.9	14.3	5.7	12.4	11.2	10.4	9.8
h5	13.2	0.0	9.1	6.2	4.3	3.4	8.4	4.2	8.1

La altura del nivel freático toma valores negativos cuando el nivel freático se encuentra por debajo de la superficie de falla, es decir, esa zona de falla se encuentra no saturada. La superficie de falla se identifica mediante los perfiles de velocidad obtenidos con la técnica PIV, la cual entrega una matriz de velocidades. Este filtro, si se considera como eje x el largo del canal, para cada x encuentra la profundidad de la zona en movimiento.

Con el fin de describir en más detalle la condición del nivel freático en el momento de la falla se mide, para cada experimento, la inclinación del nivel freático con respecto a la base del canal y la distancia entre el punto donde aflora el flujo con respecto al borde de aguas abajo del canal (superficie saturada). En la Figura 4-23 se esquematizan las variables medidas.

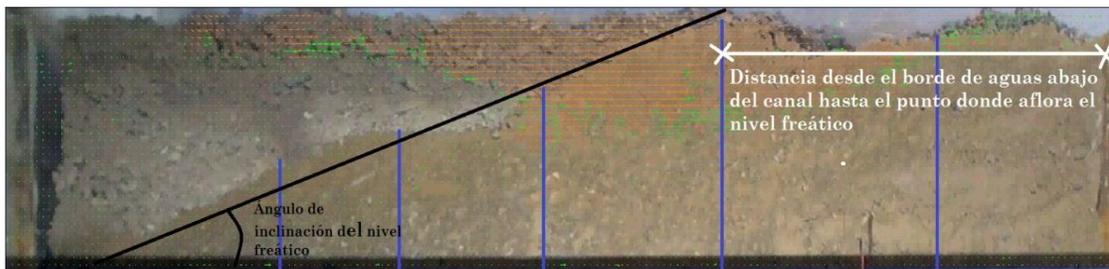


Figura 4-21: Inclinación del nivel freático y punto de afloramiento del flujo a la superficie en el momento de la falla para el caso de pendiente 43° y densidad máxima del suelo.

Tabla 4-4: Inclinación del nivel freático (α) y punto de afloramiento a la superficie del nivel freático (L_a) bajo las distintas condiciones de pendiente y densidad del suelo

Pendiente	Densidad	α [°]	L_a [m]
33°	Mínima	12	0.385
	Media	14	0.481
	Máxima	15	0.533
38°	Mínima	13	0.427
	Media	15	0.478
	Máxima	16	0.516
43°	Mínima	14	0.436
	Media	15	0.458
	Máxima	19	0.527

4.4 Condición final de la muestra

A partir de la condición final de la muestra es posible estimar el volumen de material removido, es decir, el material que escurre pendiente abajo por la rampa. En las imágenes también se aprecia cómo influye la pendiente en la remoción de material. Tanto en densidad mínima del suelo como en densidad máxima, a medida que aumenta la pendiente mayor es el volumen removido (Figura 4-22 a Figura 4-27).

Cabe notar que, en todas las experiencias, se observó que producto de la falla inicial ocurre un desplazamiento en masa de cierto volumen de material. Sin embargo, este movimiento inicial genera pequeños deslizamiento que requieren ciertas condiciones para transformarse en un aluvión propiamente tal. En el caso de densidad mínima, el movimiento inicial provocado por la aparición de la falla no termina en aluvión por lo que la remoción de material es mínima y de la zona superficial de la muestra (Figura 4-22 a Figura 4-24).



Figura 4-22: Densidad Mínima y pendiente 43°. En(a) altura del material antes de comenzar la experiencia. En (b) condición final de la muestra de suelo.

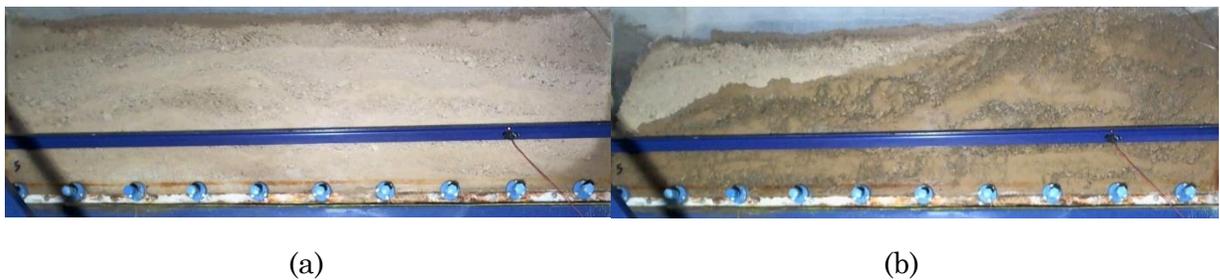


Figura 4-23: Densidad Mínima y pendiente 38°. En(a) altura del material antes de comenzar la experiencia. En (b) condición final de la muestra de suelo.



Figura 4-24: Densidad Mínima y pendiente 33°. En(a) altura del material antes de comenzar la experiencia. En (b) condición final de la muestra de suelo.

La falla en suelo denso (densidad inicial máxima) es de dimensiones similares a la falla en suelo suelto (densidad inicial mínima), sin embargo, se convierte en aluvión, arrastrando pendiente abajo todo el volumen de material involucrado en la falla. Este proceso genera movimiento de material que se encuentra en profundidades mayores al de la falla inicial, aumentando el volumen de remoción.



Figura 4-25: Densidad Máxima y pendiente 43°. En(a) altura del material antes de comenzar la experiencia. En (b) condición final de la muestra de suelo.



Figura 4-26: Densidad Máxima y pendiente 38°. En(a) altura del material antes de comenzar la experiencia. En (b) condición final de la muestra de suelo.



Figura 4-27: Densidad Máxima y pendiente 33°. En(a) altura del material antes de comenzar la experiencia. En (b) condición final de la muestra de suelo.

Esta diferencia ocurre, principalmente, debido a que en suelo denso el nivel freático alcanza alturas mayores, por lo que la zona en movimiento presenta una mayor área saturada lo que permite que el suelo pierda la consistencia y escurra pendiente abajo.

Capítulo 5

Análisis de Resultados

5.1 Dinámica del Nivel Freático

Inicialmente, basándose en los experimentos realizados en estudios anteriores, se esperaba generar un flujo subsuperficial paralelo o cuasi paralelo a la base del canal. Sin embargo, tal como se aprecia en las imágenes siguientes, lo observado en las experiencias dista en gran medida de este supuesto. A modo de ejemplo del comportamiento observado se utilizan imágenes de dos experiencias: pendiente 38° con densidad mínima y pendiente 43° con densidad máxima.

La experiencia comienza cuando se inyecta el caudal afluyente, aproximadamente de 0.1 l/s, en el extremo pendiente arriba del canal. Durante los primeros minutos se observa como el frente de agua avanza por la base del canal hasta alcanzar el extremo pendiente abajo. En esta primera etapa, el nivel freático es dispar a lo largo del canal, mostrando que el flujo subsuperficial recorre caminos preferenciales que determinan las zonas saturadas y no saturadas. Más aún, en ocasiones se generan lentes de suelo no saturado que coinciden con las zonas donde la muestra de suelo presenta concentración de partículas de menor diámetro (Figura 5-1 y Figura 5-2). Esta concentración de partículas de menor diámetro resulta de forma espontánea durante el proceso de carga del suelo en el canal.

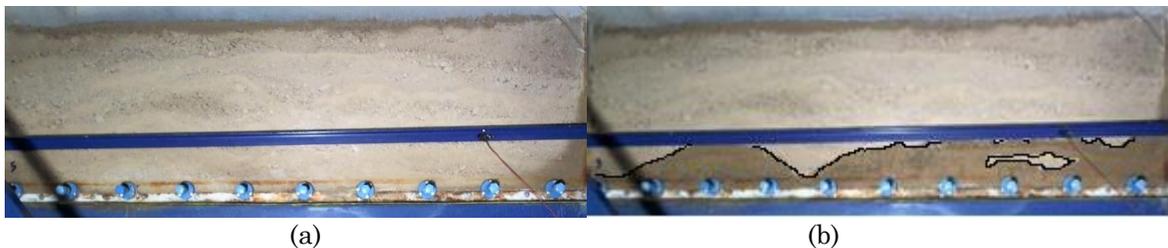


Figura 5-1: Experiencia con pendiente 38° y densidad mínima. En (a) condición de la muestra antes de iniciar el experimento y en (b) inicio del flujo subsuperficial.

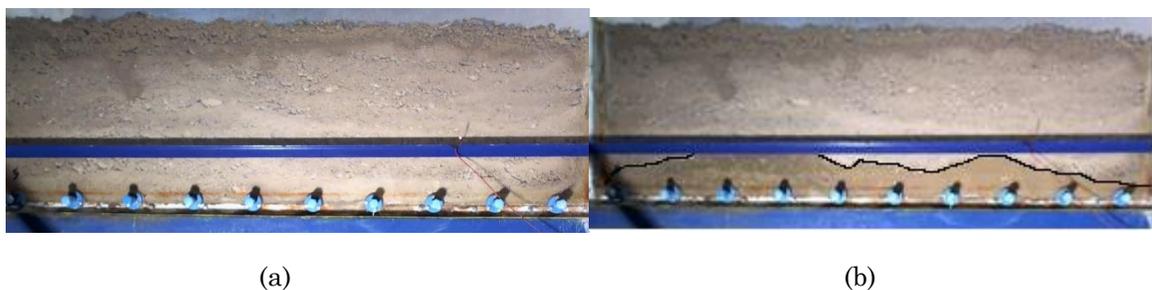


Figura 5-2: Experiencia con pendiente 43° y densidad máxima. En (a) condición de la muestra antes de iniciar el experimento y en (b) inicio del flujo subsuperficial.

A medida que el flujo continúa su paso por la muestra de suelo, el nivel freático se eleva en las zonas no saturadas alcanzando una altura similar a lo largo de todo el canal de aproximadamente 25 cm (Figura 5-3(a), y Figura 5-4(a)). Bajo estas condiciones es posible identificar un flujo cuasi paralelo a la base del canal, sin embargo, una vez alcanzada este estado, el flujo subsuperficial no evoluciona, manteniendo una altura constante a lo largo del tiempo y sin desestabilizar la muestra de suelo. A raíz de esto, se aumenta el caudal afluente a 0.4 l/s aproximadamente. Se observa que el nivel freático se eleva en un sector de la muestra de suelo (entre la zona central del canal y el extremo pendiente abajo) terminado con la condición de flujo paralelo (Figura 5-3(b), y Figura 5-4(b)).

Este aumento localizado del nivel freático, en las experiencias de prueba, se controlaba abriendo las válvulas de control tal que aumentara el caudal efluente con el fin de no alterar la condición de flujo cuasi paralelo. Sin embargo, al manipular las válvulas y mantener el flujo paralelo hasta alcanzar el nivel superficial, la experiencia finalizaba con presencia de un flujo superficial que drenaba la muestra de suelo en ausencia de falla. A partir de esto se determina que bajo las condiciones estudiadas, para generar la falla, no basta con la presencia de un flujo subsuperficial, sino que debía existir una condición no drenada aguas abajo que provoque el aumento del nivel freático en el suelo.



Figura 5-3: Experiencia con pendiente 38° y densidad mínima. En (a) condición flujo paralelo y en (b), en rojo, el aumento localizado de la presión de agua.

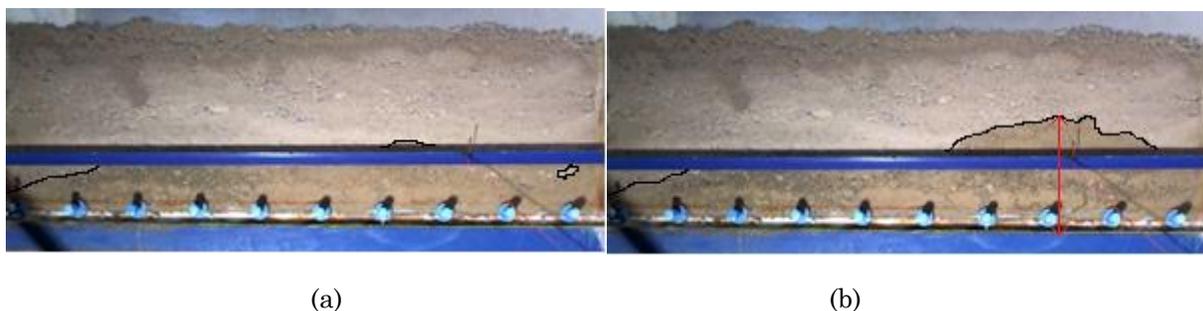


Figura 5-4: Experiencia con pendiente 43° y densidad máxima. En (a) condición flujo paralelo y en (b), en rojo, el aumento localizado de la presión de agua.

El nivel freático continúa aumentando en el mismo sector hasta alcanzar alturas cercanas al nivel superficial. A medida que se eleva el nivel freático la zona saturada aumenta también en la longitudinal. Pendiente arriba el nivel freático se mantiene siempre por debajo del máximo y pendiente abajo aumenta hasta alcanzar el nivel superficial generando dos áreas bien definidas: zona saturada y zona no saturada. El límite entre ambas zonas se puede aproximar a una recta donde la pendiente varía según la condición de densidad inicial del suelo. Menor inclinación mientras menos densa sea la muestra (Figura 5-5 y Figura 5-6).

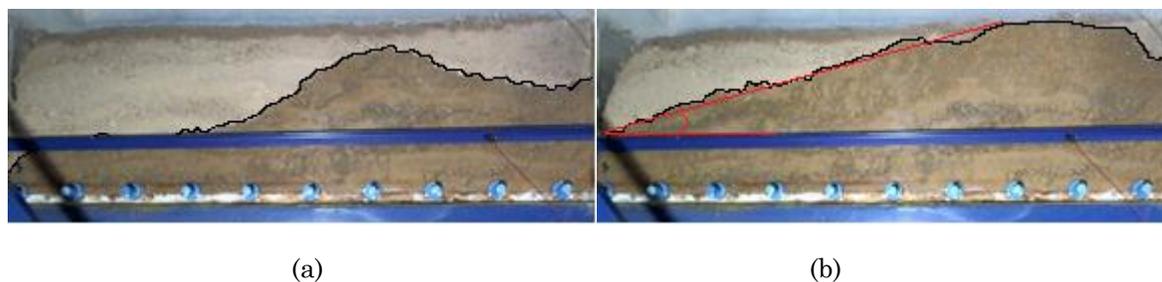


Figura 5-5: Experiencia con pendiente 38° y densidad mínima. En (a) aumento del nivel freático y en (b), en rojo, la inclinación del nivel freático en el momento de la falla.

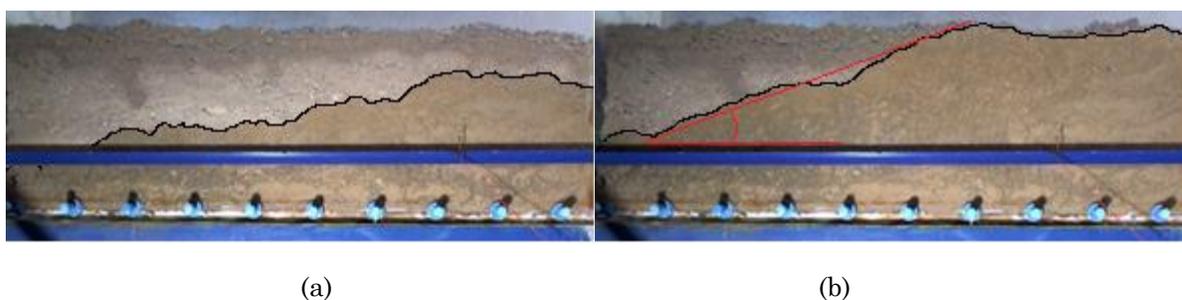


Figura 5-6: Experiencia con pendiente 43° y densidad máxima. En (a) aumento del nivel freático y en (b) inclinación del nivel freático en el momento de la falla.

5.2 Formas de falla

A continuación se describen tres tipos de fallas identificadas en las experiencias. Las fallas se caracterizan dependiendo del grado de compactación inicial del suelo (densidad), por lo que se denominan de la siguiente manera: falla en suelo suelto, falla en suelo medio y falla en suelo denso. La pendiente juega un rol principal al momento de analizar el volumen removido, no así el tipo de falla observada.

A continuación se realiza, para cada tipo de falla, un análisis comparativo de las variables controladas y medidas durante el estudio, como la profundidad de la falla, el largo de falla, la ubicación de la falla y la altura del nivel freático.

5.2.1 Falla en suelo suelto

Cuando se inicia la falla en suelo suelto (densidad $\sim 1600 \text{ kg/m}^3$), la muestra de suelo ya presenta una deformación con respecto a la condición inicial que se detecta por la separación entre la cara transversal aguas arriba del canal y el suelo, observándose un aumento de la altura de la muestra en la zona de aguas abajo y una disminución de la altura de la muestra en la zona de aguas arriba. Esta deformación se aprecia, principalmente, en la mitad superior de la muestra, y ocurre a medida que va aumentando el nivel freático del flujo subsuperficial. Este primer movimiento se asocia al bajo nivel de compactación, ya que no se observa en suelo medio ni en suelo denso. Durante esta etapa, se observan velocidades promedio superficial y lateral, entre uno o dos órdenes de magnitud menor que la magnitud de la velocidad en el momento de la falla.

En el momento de la falla hay una importante área de suelo no saturada, que se refleja en el valor de la distancia entre el extremo de aguas abajo y el punto donde aflora el flujo subsuperficial (L_a), y la inclinación del nivel freático (α). En las tres pendientes estudiadas, ambos parámetros presentan los valores más bajos con respecto a las otras densidades (suelo medio y suelo denso). Los valores medidos son $L_a = 0,38 \text{ m}$ y $\alpha = 12^\circ$ para pendiente 33° , $L_a = 0,43 \text{ m}$ y $\alpha = 13^\circ$ en pendiente 38° y $L_a = 0,24 \text{ m}$ y $\alpha = 14^\circ$ en pendiente 43° .

La falla se presenta como un movimiento en masa de una zona de la muestra de suelo. Este movimiento tiene velocidades laterales máximas puntuales cercanas a los 5 mm/s . El largo de la falla abarca desde el extremo de aguas arriba de la muestra hasta centímetros aguas abajo del punto de afloramiento del flujo subsuperficial, alcanzando un largo de 191 cm en pendiente 33° , 127 cm en pendiente 38° y 154 cm en pendiente 43° . Esta distribución de la falla implica que la mayor área en movimiento se encuentra no saturada. La forma de la superficie de falla queda determinada por la profundidad de la zona en movimiento a lo largo de la falla. En la zona central la profundidad es mayor y en los extremos de la falla menor, generando una superficie, desde la vista lateral, semejante a un arco de círculo. La profundidad en el centro de la falla es de 26 cm en pendiente 33° , 22 cm en pendiente 38° y 26 cm en pendiente 43° . En la Figura 5-7 se esquematiza la superficie de falla.

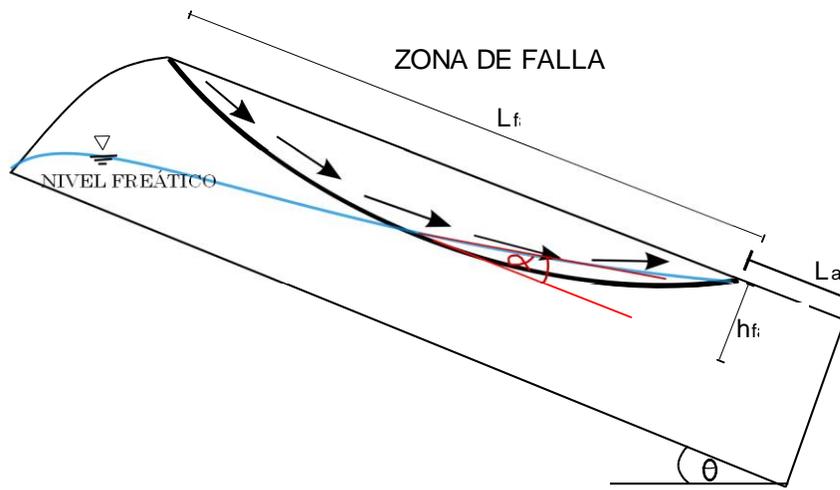


Figura 5-7: Esquema de la falla en suelo suelto.

Las siguientes imágenes muestran el instante en que se identifica la falla para las tres condiciones de pendiente. La imagen superior muestra los vectores de velocidad, y la altura del nivel freático, y la imagen inferior, la magnitud del campo de velocidad de la muestra de suelo en el inicio del movimiento.

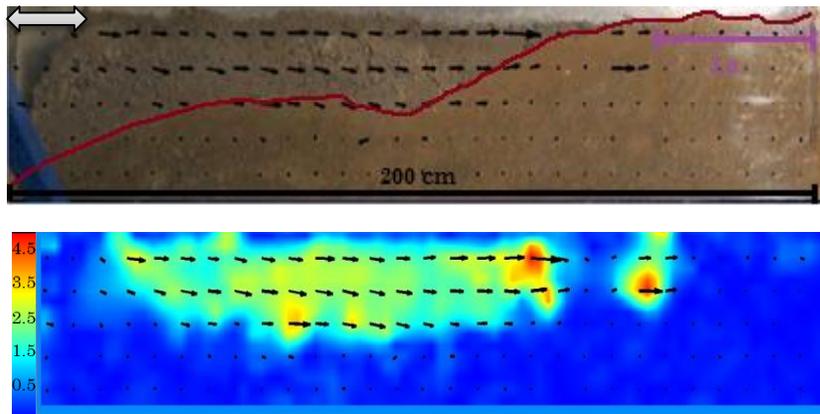


Figura 5-8: Falla en pendiente 33°. Arriba se observa en rojo, la altura del nivel freático en el momento de la falla, en morado L_a y la flecha blanca destaca la separación entre el suelo y cara aguas arriba del canal. Abajo la magnitud de la velocidad en mm/s.

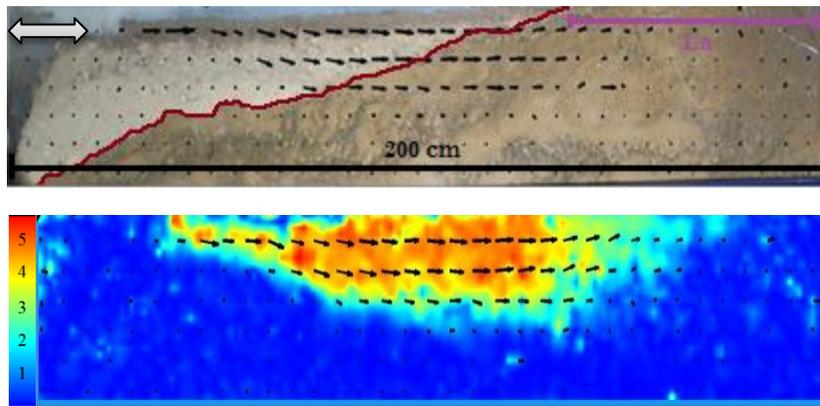


Figura 5-9: Falla en pendiente 38°. Arriba se observa en rojo, la altura del nivel freático en el momento de la falla, en morado L_a y la flecha blanca destaca la separación entre el suelo y cara aguas arriba del canal. Abajo magnitud de la velocidad en mm/s.

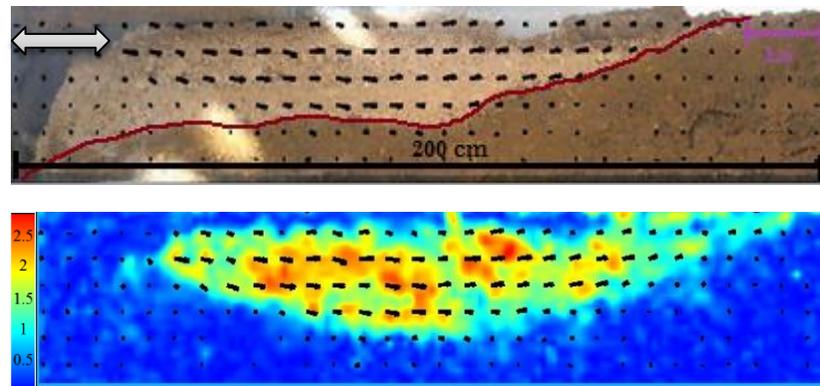


Figura 5-10: Falla en pendiente 43°. Arriba se observa en rojo, la altura del nivel freático en el momento de la falla, en morado L_a y la flecha blanca destaca la separación entre el suelo y cara aguas arriba del canal. Abajo magnitud de la velocidad en mm/s.

5.2.2 Falla en suelo medio

La separación del suelo con respecto al extremo pendiente arriba del canal, cuando se inicia la falla, es menor a la observada en suelo suelto. La muestra mantiene en mayor grado su forma inicial (antes de la inyección del flujo subsuperficial).

El instante en que inicia la falla, se detecta por la aparición de una grieta superficial transversal que determina el largo de la zona en movimiento, y esto ocurre cuando el nivel freático ha alcanzado alturas mayores, con respecto a la base del canal, que en el caso de suelo suelto, lo que genera una mayor área de suelo saturado. Esto implica que para desestabilizar la muestra de suelo con densidad media se requiere una mayor presión de agua que en el caso anterior. Esto se ve reflejado en los parámetros L_a y α cuyos valores son $L_a=0.48$ m y $\alpha=14^\circ$ en pendiente 33°, $L_a=0.47$ m y $\alpha=15^\circ$ en pendiente 38° y $L_a=0.50$ m y $\alpha=15^\circ$ en pendiente 43°. En general, α es mayor que en densidad mínima y el largo saturado desde el borde de aguas abajo también es mayor que en densidad mínima.

La falla se presenta como un movimiento en masa en la zona de aguas abajo de la muestra de suelo. Este movimiento presenta velocidades laterales máximas puntuales cercanas a los 15 mm/s. El largo de la falla abarca desde la zona central del canal hasta el extremo de aguas abajo, alcanzando un largo de falla de 110 cm en pendiente 33°, 96 cm en pendiente 38° y 102 cm en pendiente 43°. Esta distribución de la falla implica que la mayor área de la falla se encuentra saturada (Figura 5-11). La forma de la superficie de falla queda determinada por la profundidad de la zona en movimiento. Al igual que en el caso anterior, se observa una superficie de falla circular. La profundidad en el centro de la falla es de 16 cm en pendiente 33°, 15 cm en pendiente 38° y 20 cm en pendiente 43°. En la Figura 5-11 se esquematiza la superficie de falla.

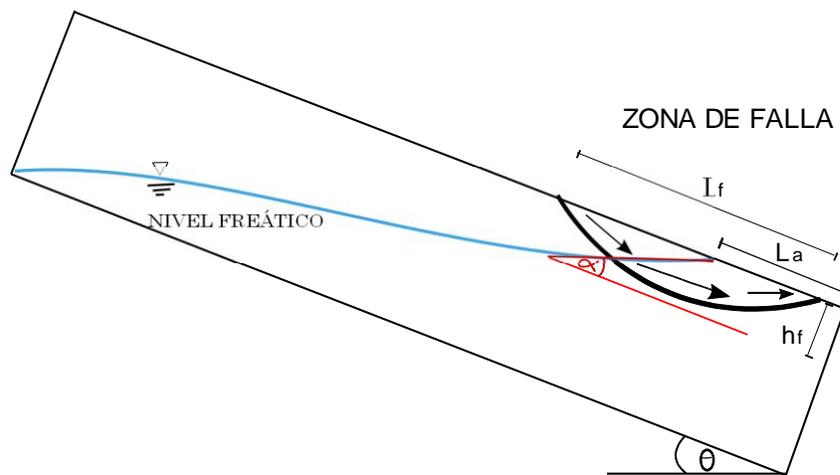


Figura 5-11: Esquema de la falla en suelo medio.

Las siguientes imágenes (Figura 5-12, Figura 5-13 y Figura 5-14) muestran el instante en que se detecta la falla para las tres condiciones de pendiente. La imagen superior muestra los vectores de velocidad y la imagen inferior la magnitud del campo de velocidad de la muestra de suelo en el inicio del movimiento.

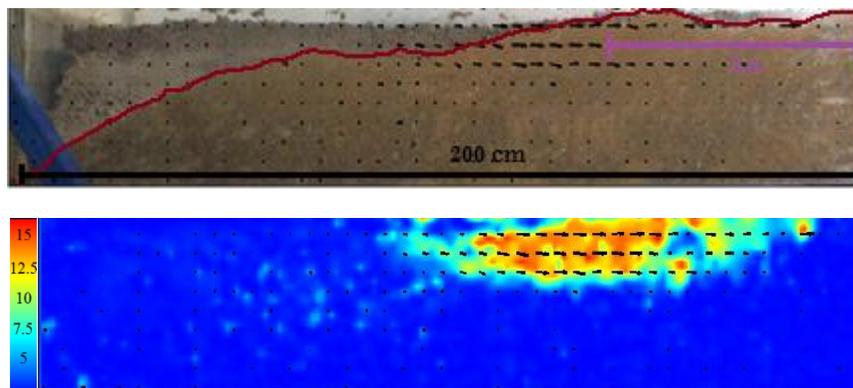


Figura 5-12: Falla en pendiente 33°. Arriba se observa en rojo, la altura del nivel freático en el momento de la falla y en morado L_a . Abajo la magnitud de la velocidad en mm/s.

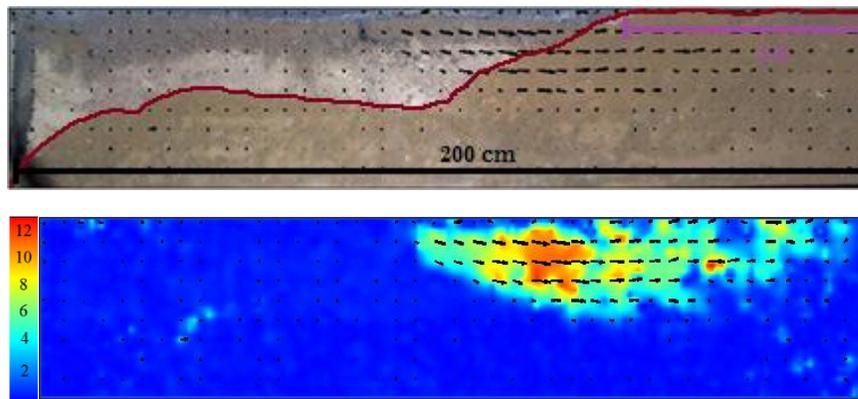


Figura 5-13: Falla en pendiente 38°. Arriba se observa en rojo, la altura del nivel freático en el momento de la falla y en morado L_a . Abajo magnitud de la velocidad en mm/s.

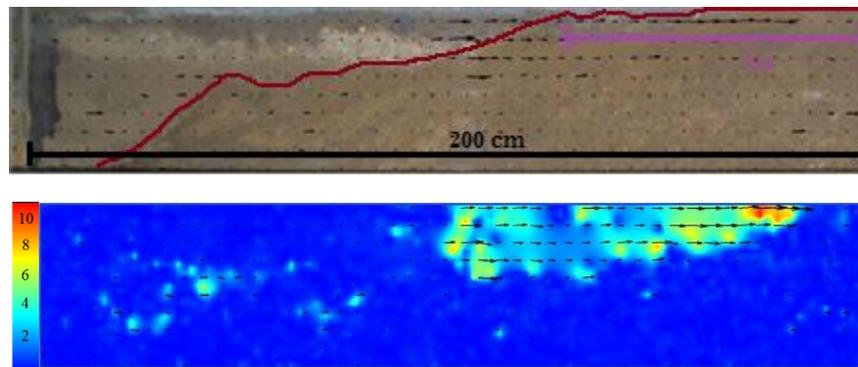


Figura 5-14: Falla en pendiente 43°. Arriba se observa en rojo, la altura del nivel freático en el momento de la falla y en morado L_a . Abajo la magnitud de la velocidad en mm/s.

5.2.3 Falla en suelo denso

Cuando se inicia la falla en suelo denso, la muestra de suelo presenta deformaciones previas semejantes a las observadas en suelo medio, donde la característica principal es la separación de la muestra de suelo del extremo de aguas arriba del canal.

El movimiento se genera cuando el nivel freático ya ha alcanzado el nivel superficial y la mayor parte de la muestra de suelo se encuentra saturada. En el área superficial aparece una grieta transversal que delimita la extensión de la falla. De los tres casos analizados, éste es el que presenta una mayor área saturada, lo que implica que para desestabilizar la muestra de suelo denso se requiere una mayor cantidad de agua que en suelo suelto y suelo medio. Los parámetros asociados al nivel freático presentan los siguientes valores: $L_a = 0.96$ m y $\alpha = 15^\circ$ en pendiente 33°, $L_a = 0.86$ m y $\alpha = 16^\circ$ en pendiente 38° y $L_a = 0.87$ m y $\alpha = 19^\circ$ en pendiente 43°.

La falla se presenta como un movimiento en masa en la zona central de la muestra de suelo. Este movimiento presenta velocidades laterales máximas puntuales entre los 18 mm/s y los 30 mm/s. El largo de la falla es mayor al observado en suelo medio alcanzando los 121 cm en

pendiente 33°, 136 cm en pendiente 38° y 146 cm en pendiente 43°. Esta distribución de la falla implica que incorpora áreas saturadas y no saturadas. La superficie de falla, al igual que en los casos anteriores, es circular. La profundidad en el centro de la falla tiene valores similares a los del caso de suelo con densidad media: 15 cm en pendiente 33°, 15 cm en pendiente 38° y 20 cm en pendiente 43°. En la Figura 5-15 se esquematiza la superficie de falla.

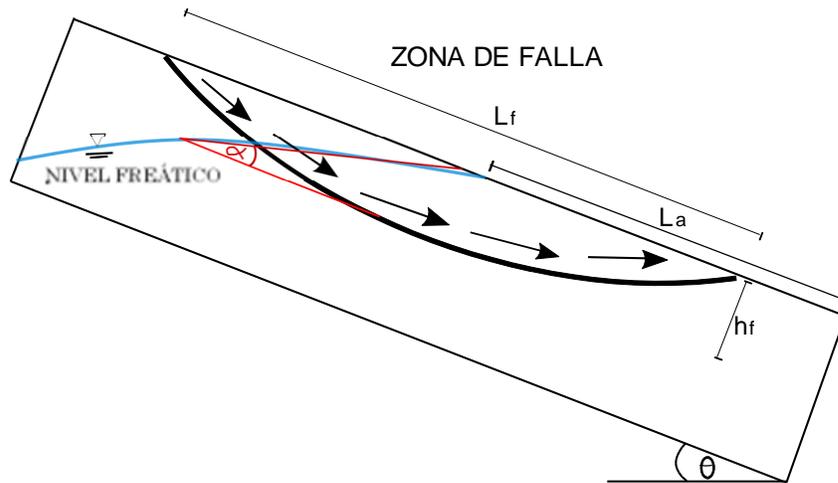


Figura 5-15: Esquema falla en suelo denso.

Las siguientes imágenes (Figura 5-16, Figura 5-17 y Figura 5-18) muestran el instante en que se identifica la falla para las tres condiciones de pendiente. La imagen superior muestra los vectores de velocidad y la altura del nivel freático, y la imagen inferior, la magnitud del campo de velocidad de la muestra de suelo en el inicio del movimiento.

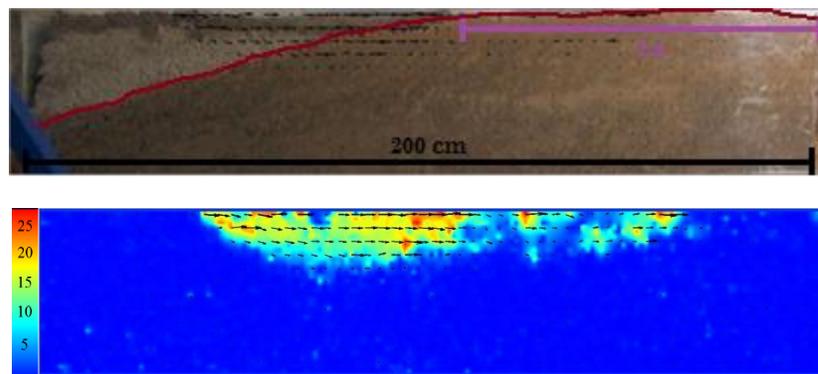


Figura 5-16: Falla en pendiente 33°. Arriba se observa en rojo, la altura del nivel freático en el momento de la falla y en morado L_a . Abajo la magnitud de la velocidad en mm/s.

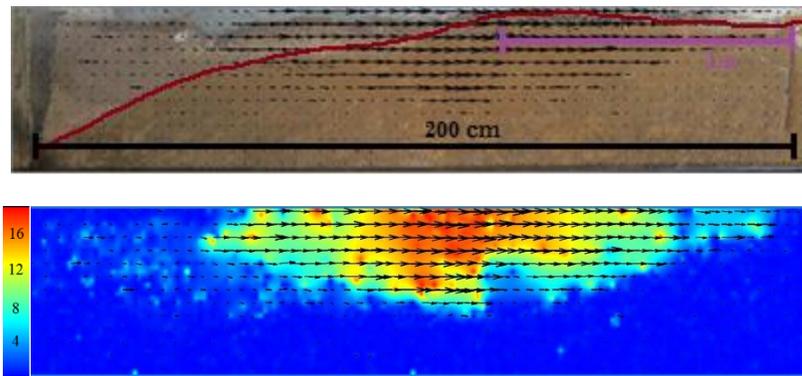


Figura 5-17: Falla en pendiente 38°. Arriba se observa en rojo, la altura del nivel freático en el momento de la falla y en morado L_a . Abajo la magnitud de la velocidad en mm/s.

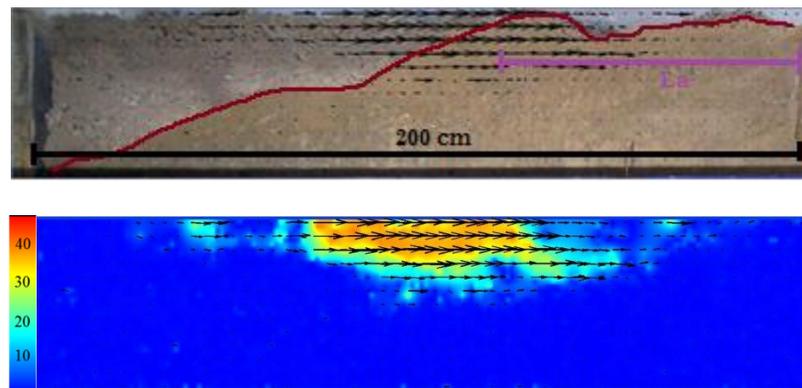


Figura 5-18: Falla en pendiente 43°. Arriba se observa en rojo, la altura del nivel freático en el momento de la falla y en morado L_a . Abajo la magnitud de la velocidad en mm/s.

5.3 Análisis de Estabilidad

La falla es resultado de la desestabilización del suelo. En este caso, el principal causante de esta desestabilización es la presencia de un flujo subterráneo, que genera un aumento del peso del terreno y la aparición de presión de poros. Para el cálculo e identificación de esta condición de inestabilidad se utiliza el método de equilibrio límite, donde se comparan las fuerzas que se oponen al movimiento con las fuerzas que inducen el movimiento, dando origen al ya mencionado factor de seguridad.

El análisis de estabilidad mediante el modelo de talud infinito, establece que el flujo subsuperficial es paralelo o cuasi paralelo a la inclinación topográfica del suelo. Los últimos estudios (Milledge et al., 2012) indican que este modelo es válido para fallas donde la relación entre el largo de la muestra y la profundidad de la falla es mayor a 25.

En la Figura 5-19 se observa que, en las experiencias realizadas, el valor del largo de la muestra es entre 6 a 7 veces mayor que la profundidad de la falla en suelo con densidad inicial mínima, entre 10 y 14 veces mayor que la profundidad de la falla en suelo con densidad inicial media y entre 8 y 14 veces mayor que la profundidad de falla en suelo con densidad inicial máxima, por lo que se espera que el modelo de talud infinito sea aplicable pero con precaución. Sin embargo, al analizar las fallas generadas en la etapa experimental

se detecta un flujo subsuperficial inclinado, la aparición de una falla rotacional de superficie circular y un largo de falla acotado, que en la mayoría de los casos, no abarca el largo total del canal, a partir de lo que se determina que el modelo de talud infinito es inaplicable en este caso.

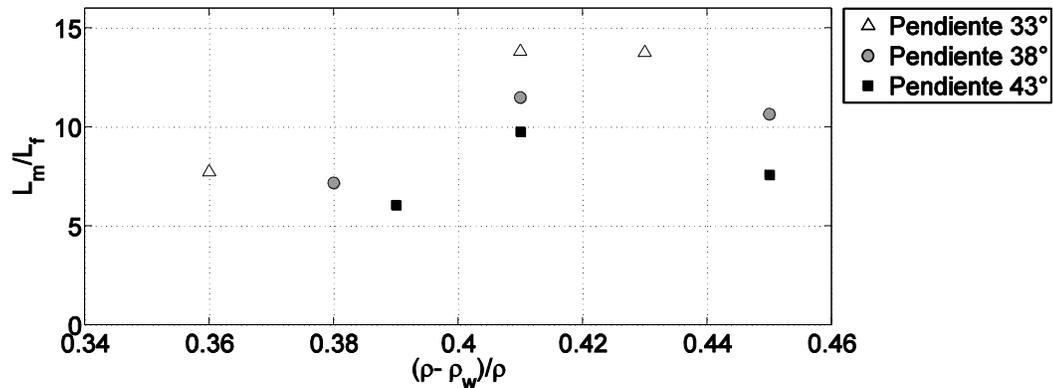


Figura 5-19: Validando modelo de pendiente infinita. Largo muestra/profundidad promedio de la falla en cada experiencia.

Bajo esta perspectiva, se propone analizar la estabilidad del suelo mediante el método de las dovelas, el cual se aplica a superficies circulares, y determina el equilibrio límite, considerando como fuerzas estabilizadoras la resistencia del suelo al esfuerzo de corte y como fuerzas desestabilizadoras el peso del suelo y del agua. Incluye los efectos de las presiones intersticiales (Figura 5-20).

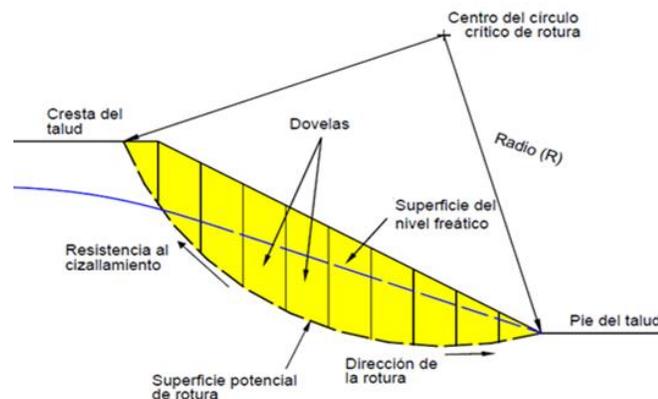


Figura 5-20: Análisis de estabilidad mediante Método de las Dovelas.

En la figura 5-21 se presenta un esquema de las fuerzas que actúan en una dovela con presencia de flujo subsuperficial, donde θ es la inclinación topográfica del suelo, α es la inclinación del nivel freático con respecto al plano inclinado del suelo en estudio, β_i es la inclinación con respecto a la horizontal de la superficie de falla para la dovela i y τ_i es la resistencia efectiva al corte del suelo, es decir, la resistencia total al corte (Mohr-Coulomb) menos la presión de poros.

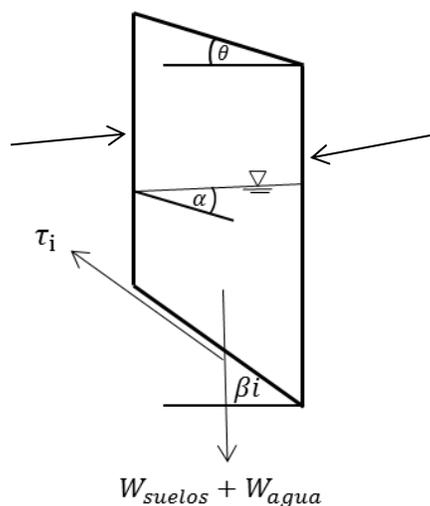


Figura 5-21: Equilibrio de fuerzas en una dovela.

Para resolver este método y conocer las fuerzas totales que están actuando en el momento de la falla, además del factor de seguridad, se utiliza el programa GeoStudio 2007. Este programa se descarga de forma gratuita de la página <http://www.geo-slope.com/> y permite el acceso a la licencia de estudiante.

En este programa se utilizan dos software. En el software Slope/W el input es la geometría del problema, el tipo de material (cohesión, densidad inicial del suelo y ángulo de fricción interna) y las condiciones de borde, como por ejemplo, borde rocoso. Por otro parte, en Seep/W se genera el flujo subsuperficial controlando las condiciones de altura de presión de aguas arriba y aguas abajo del suelo. Luego, se resuelve el problema de estabilidad utilizando el procedimiento planteado por Morgenstern y Price, e incluyendo la condición de flujo subsuperficial desarrollada en Seep/W. El procedimiento desarrollado por Morgenstern y Price es válido para cualquier superficie de falla y aplicable, únicamente, mediante cálculos computacionales.

Para definir el tipo de material se utiliza la granulometría realizada, donde se determinó que la muestra de suelo traída de la cuenca del Río Coya, corresponde a un suelo arenoso con poca presencia de finoa. A partir de esta clasificación y revisando en la literatura los valores típicos de cohesión y del ángulo de fricción interna para estos suelos, se escogen los siguientes valores:

- Cohesión (c) = 0 kPa
- Ángulo de fricción interna (φ) = 38°

El ángulo de fricción interna no solo depende del tipo de suelo sino también del grado de compactación de la muestra. Mientras más compactado mayor es el ángulo de fricción interna. A pesar de esto, a modo de aproximación se define un único ángulo de fricción interna para las tres densidades del suelo estudiadas.

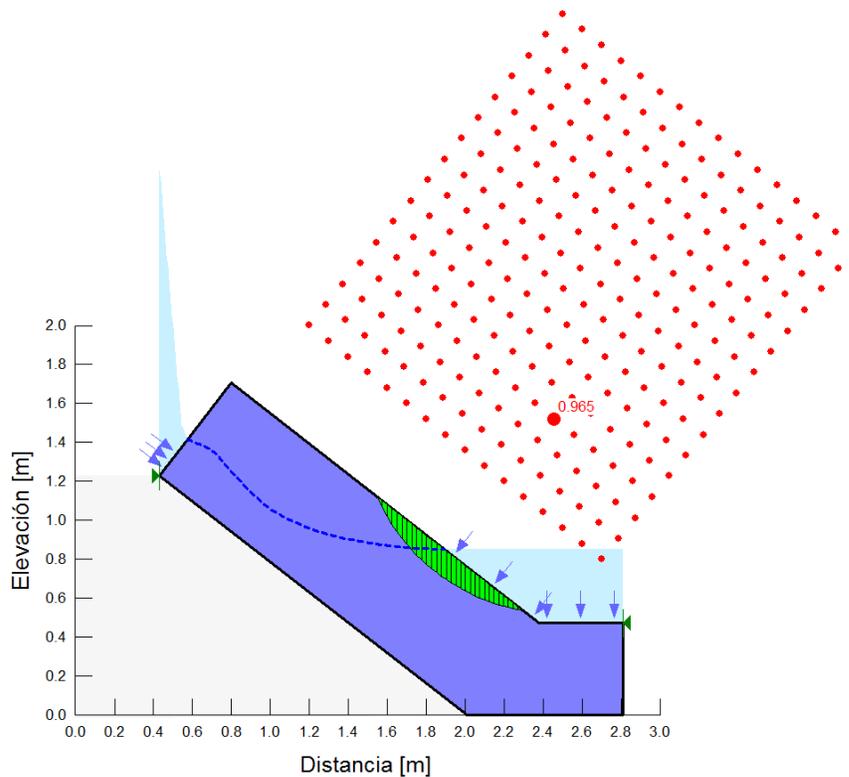


Figura 5-22: Ejemplo del modelo realizado en Geoslope para el cálculo del Factor de Seguridad con densidad media y pendiente 38°.

En arenas, el ángulo de fricción interna define también la máxima inclinación que puede presentar el suelo para ser considerado como un sistema estable estáticamente. Es decir, en pendiente 38° (límite) y 43° el sistema es inestable estáticamente. Sin embargo, la pared del extremo de aguas abajo del canal que sostiene la muestra de suelo permite estudiar esta configuración, la cual es de interés debido a las pendientes observadas en terreno.

En el caso del flujo subsuperficial, las condiciones de borde se definieron de tal forma que el área saturada del modelo representara lo observado en la experiencia, para esto, se utilizaron dos parámetros, la distancia entre el extremo de aguas abajo del canal y el punto de afloramiento del flujo subsuperficial a la superficie (L_a) y la altura del nivel freático en el extremo de aguas arriba de la muestra. Existe una configuración diferente para cada experimento realizado.

Para realizar el análisis de estabilidad se dibuja una grilla en el entorno de la muestra cuyos puntos corresponden a centros de círculos que generan diversas superficies de fallas cuyo radio se limita definiendo también un área de falla dentro de la muestra de suelo. Esta área de falla se determina a partir de la profundidad de falla observada en cada experiencia.

Como resultado del programa, se obtiene el factor de seguridad de todas las superficies de fallas generadas para el rango de radios y centros predefinidos (Figura 5-22).

Luego, se le asigna a cada combinación de pendiente y densidad del suelo un radio y un centro que modele la falla observada bajo condiciones controladas. Para esto se impone el largo de falla y la posición con respecto a los extremos del canal.

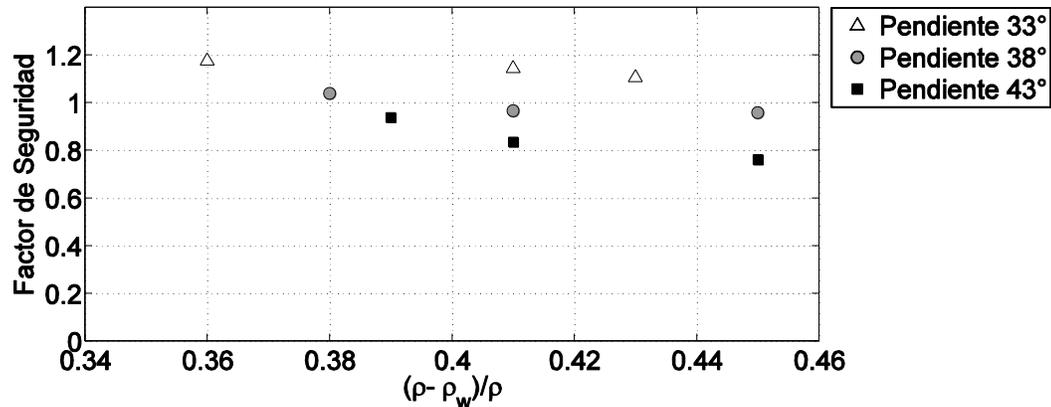


Figura 5-23: Factor de Seguridad calculado con GeoStudio.

En la Figura 5-23 se observa que en todos los casos el factor de seguridad es cercano a 1. Es decir, en las nueve experiencias la ladera alcanza la condición de inestabilidad en el instante que se detecta el inicio del movimiento. También se observa que a menor pendiente la ladera tiene un factor de seguridad mayor, por lo que es la condición menos inestable. Al detenerse en las densidades del suelo, las laderas más inestables son las de suelo denso, ya que presentan un factor de seguridad menor.

5.4 Análisis Adimensional

Para realizar el análisis adimensional se definen las variables relevantes del problema, entre las que se encuentran: densidad inicial del suelo (ρ), densidad del agua (ρ_w), inclinación del nivel freático (α), profundidad de falla (h_f), largo de falla (L_f), largo saturado de la falla (L_{sat}), distancia desde el extremo de aguas abajo del canal al centro de la falla (D_{cf}) y la distancia desde el extremo de aguas abajo del canal y el punto de afloramiento del flujo subsuperficial a la superficie (L_a). Luego, utilizando el teorema phi y realizando un análisis simplificado de las fuerzas actuando en la masa de suelo donde se origina la falla, se obtienen los adimensionales. La ecuación 16 muestra los resultados de este análisis.

En la figura 5.24 se esquematiza las consideraciones realizadas en el análisis de fuerzas. La superficie de falla se aproxima a un rectángulo y se desprecian las fuerzas laterales.

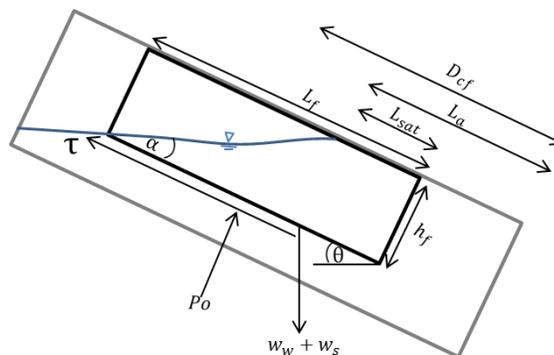


Figura 5-24: Esquema del análisis de fuerzas en la masa de suelo que falla.

En las ecuaciones (11) a (14) se presenta el cálculo de los esfuerzos resistivos y solicitantes, que tiene la finalidad de obtener una expresión (Ecuación 15) que permita analizar la

condición de las muestra de suelo en el momento de la falla y cómo se relacionan las variables involucradas. Los adimensionales obtenidos se detallan en la Ecuación 16.

$$\sigma = h_f L_f \gamma_t \cos \theta \quad (11)$$

$$p = h_w L_{sat} \gamma_t \cos \theta \quad (12)$$

$$\tau_f = \left(h_f L_f \gamma_t \cos \theta - \frac{h_f}{\cos \alpha} \left(L_{sat} + \frac{h_f}{\tan \alpha} \right) \right) \gamma_w \tan \varphi \quad (13)$$

$$\tau = h_f L_f \gamma_t \sin \theta \quad (14)$$

$$\frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\tan \varphi}{\sin \theta} - \frac{\gamma_w}{\gamma_t} \left(\frac{1}{\cos \alpha} \left(\frac{L_{sat}}{L_f} + \frac{h_f}{L_f} \left(\frac{1}{\tan \alpha} \right) \right) \right) \frac{\tan \varphi}{\sin \theta} \quad (15)$$

$$\pi_1 = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \quad \pi_2 = \frac{L_{sat}}{L_{falla}} \frac{1}{\cos \alpha}$$

$$\pi_3 = \frac{h_{falla}}{L_{falla}} \frac{1}{\tan \alpha} \frac{1}{\sin \theta} \quad \pi_4 = \frac{L_a}{D_{cf}} \quad (16)$$

La primera relación que se analiza es con respecto al ángulo de inclinación del nivel freático, ya que, tal como se comentó anteriormente, el nivel freático se inclina producto de un aumento localizado de la presión de agua en la zona de aguas abajo. Debido a que el largo del canal es constante y la altura del nivel freático en la zona de aguas arriba es similar en todas las experiencias, mientras mayor es el ángulo de inclinación mayor es el área saturada de la muestra.

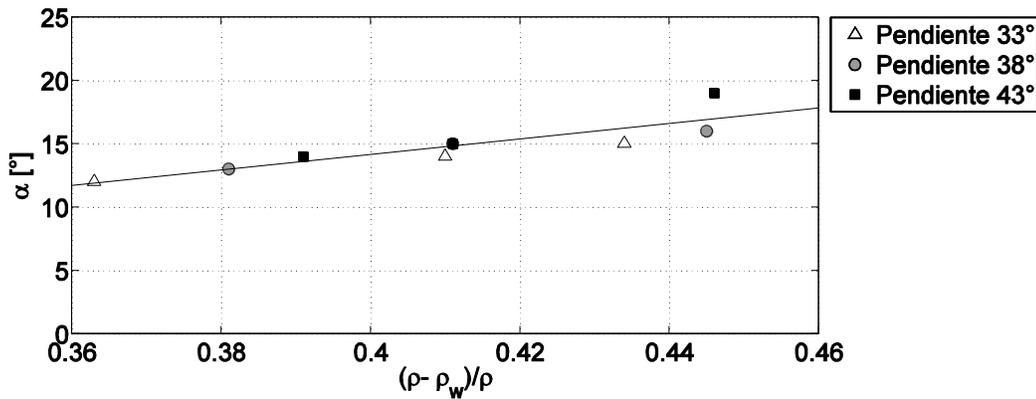


Figura 5-25: Inclinación del nivel freático.

El gráfico de la Figura 5-25, muestra que la inclinación del nivel freático en el momento de la falla es mayor cuando el suelo es más compacto. Una mayor inclinación del nivel freático implica un porcentaje mayor de área saturada del suelo, debido a que el nivel freático, en todas las experiencias y bajo todas las condiciones, en el límite de aguas arriba tiene una altura cercana a los 25 cm. A partir de esta condición de borde, mientras mayor sea la inclinación del nivel freático mayor es el área saturada de la muestra. Luego, se concluye

que a medida que el suelo presenta una densidad inicial mayor se requiere que el nivel freático alcance alturas mayores y sature una mayor área para que se genere la falla.

En la Figura 5-26 se observa como varía la posición del centro de la falla dependiendo de la densidad inicial de la muestra y del punto de afloramiento del flujo subsuperficial con respecto a la condición de borde de aguas abajo. La relación encontrada permite estimar la posición del centro de falla conociendo la densidad inicial del suelo y el punto del afloramiento del flujo subsuperficial, este último parámetro, se puede obtener mediante un modelo hidrogeológico que incluya la condición de borde, como por ejemplo, un afloramiento rocoso o un cambio en la permeabilidad del suelo. De acuerdo al gráfico de la Figura 5-26, existe una densidad límite entre 0.38 y 0.41, es decir, entre 1642 kg/m³ y 1695 kg/m³, a partir de la cual se esperan dos comportamientos, para densidades menores a esta densidad límite la relación punto de afloramiento del flujo subsuperficial y ubicación del centro de falla disminuye cuando disminuye la densidad inicial del suelo, mientras que, para densidades mayores a esta densidad límite, la relación punto de afloramiento del flujo subsuperficial con la ubicación del centro de falla disminuye a medida que aumenta la densidad inicial del suelo.

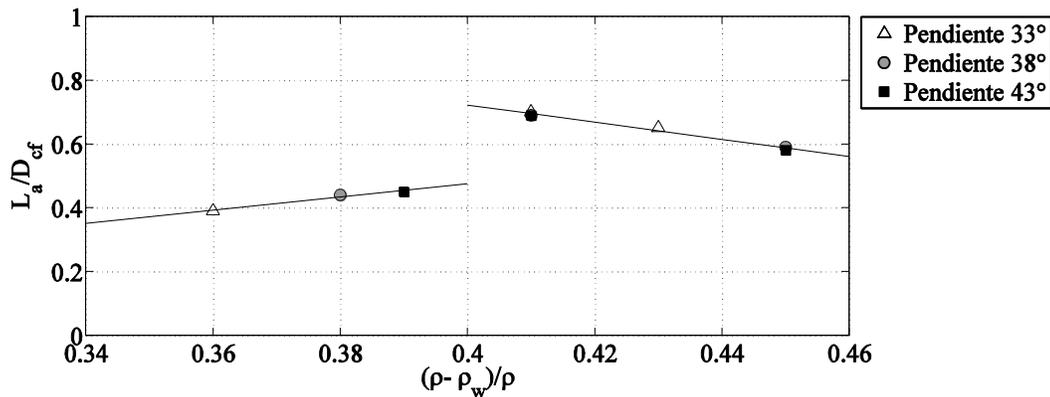


Figura 5-26: Relación que permite localizar la falla en la ladera.

En el gráfico de la Figura 5-27 se observa como varían los parámetros que determinan el área saturada de la zona en movimiento (α y L_{sat}) con la densidad inicial del suelo. Esta relación es fundamental ya que se requiere un grado de saturación mínimo en el suelo en movimiento para provocar la pérdida de consistencia del suelo, condición básica para que se genere el aluvión. Al analizar el gráfico se identifica una densidad inicial límite que determina dos tipos de comportamiento.

Esta densidad límite coincide con la densidad límite definida a partir del gráfico de la Figura 5-27 y se encuentra dentro del mismo rango, es decir, entre 0.39 y 0.41. Cuando la densidad inicial del suelo es menor a la densidad límite, el área saturada de la zona en movimiento aumenta a medida que disminuye la densidad inicial del suelo, alcanzando el valor de 0.15 en la densidad mínima estudiada (1571 kg/m³). En el caso de densidades iniciales del suelo mayores a la densidad límite, el área saturada de la zona en movimiento disminuye a medida que aumenta la densidad inicial del suelo, tomando el valor de 0.40 para la densidad máxima estudiada (1805 kg/m³). La tendencia encontrada para densidades iniciales del suelo mayores a la densidad límite, alcanza valores mayores a la asociada a las densidades iniciales del suelo menores a la densidad límite. Esto implica que la falla que ocurre en suelos que inicialmente presentan una densidad mayor a la densidad límite, presenta un mayor grado de saturación por lo que es más probable que se genere el aluvión.

Al incluir en el análisis el registro de las experiencias realizadas se propone que, para el caso de inicio de aluviones producto de un flujo subsuperficial inclinado debido a la presencia de una condición de borde aguas abajo y cuando el material disponible es acotado, se va a generar aluvión cuando la densidad inicial sea mayor a la densidad límite definida y, mientras mayor sea la densidad inicial menor porcentaje de la zona en movimiento se encontrará saturada en el momento de la falla, por lo que el tipo de escurrimiento posterior a la falla se relacionará también con la densidad inicial de suelo.

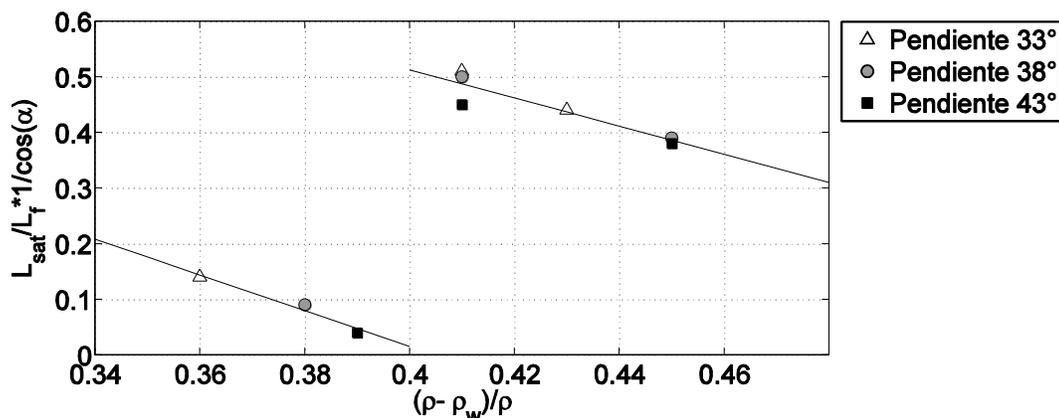


Figura 5-27: Estimación del volumen saturado de la zona de falla.

En la Figura 5-28 se presenta una última relación que involucra los parámetros que describen las dimensiones de la falla (h_f y L_f). En el gráfico de esta figura, se observa una tendencia lineal de los datos, de pendiente negativa, que permite estimar h_f/L_f dependiendo de la densidad inicial del suelo. Esto considerando que se conoce la inclinación del nivel freático en el momento de la falla (α), a partir del gráfico de la Figura 5-25, y, que se conoce también, la inclinación del talud en estudio (datos del terreno) (θ). Luego, la profundidad máxima de la falla (h_f) va a ser la altura del material disponible (material sedimentario) en terreno. Finalmente, con estos datos, se puede tener una estimación de la dimensión máxima esperada de la falla.

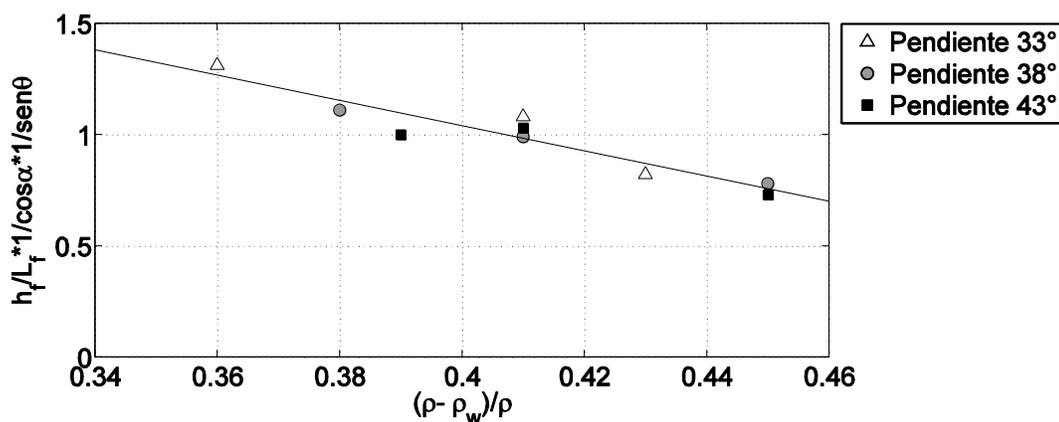


Figura 5-28: Dimensionamiento de la falla en para un talud acotado y flujo subsuperficial inclinado.

5.5 Falla en terreno

Tal como se comentó en capítulos anteriores, la zona en estudio, corresponde a la cuenca alta del río Coya. Este río para por Sewell (Figura 5-29).

Para identificar las fallas en terreno, se utilizan imágenes satelitales (Google Earth), sin embargo, la zona en estudio es cordillerana por lo que la presencia de nieve dificulta la tarea. Es por esto que se utiliza un estudio realizado por Gorder (2001) el cual describe el gran aluvión de Sewell ocurrido en 1993. Este aluvión fue la unión de dos aluviones, el aluvión del río Coya y el aluvión de la Quebrada el Teniente, ambos se originaron en las zonas inferiores de sus respectivos cursos de agua.

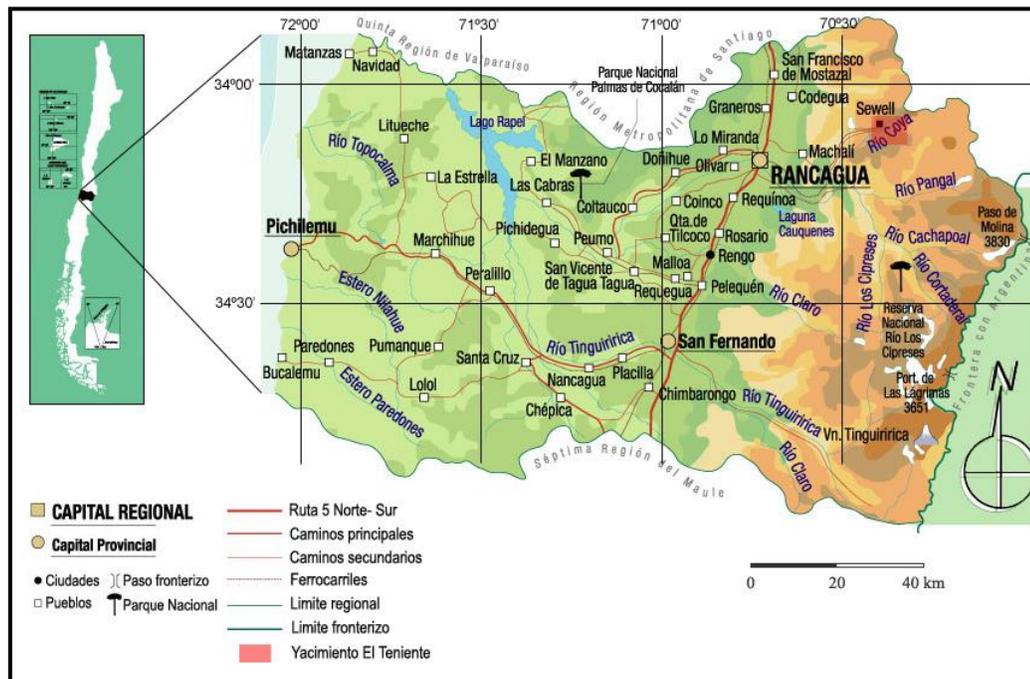


Figura 5-29: En rojo, ubicación de la cuenca del río Coya (Golder, 2001).

Con el fin de contrastar la falla observada en las experiencias en laboratorio con las huellas de estos aluviones se revisaron e identificaron las fallas ocurridas mediante imágenes satelitales y utilizando la ubicación geográfica determinada por Golder (2001).

- Falla en cuenca Alta Río Coya: 6229390N /373237E
- Falla en cuenca Quebrada El Teniente: 6227047N /374768E

En la Figura 5-30 se observan las huellas de ambas fallas. La falla en la cuenca del río Coya se extiende a lo largo del talud, generando un largo de falla cercano al largo del talud. Por el contrario la falla en la Quebrada El Teniente se extiende en la zona superior del talud. Es decir, en este segundo caso, debe existir una condición de borde aguas abajo de la falla que haya limitado el paso del flujo subsuperficial a la zona inferior del talud, generando un largo de falla acotado, semejante a la condición experimental estudiada. Dada esta similitud de la falla en terreno y de las fallas generadas bajo condiciones controladas se analiza en más detalle la falla ocurrida en la cuenca de la quebrada El Teniente.



Figura 5-30: Imagen Satelital de la zona de estudio. En rojo, la huella actual de la zona donde ocurrió la falla en la cuenca alta del río Coya para el aluvión de 1993. En blanco, la huella actual de la zona donde ocurrió la falla en la cuenca de la Quebrada de El Teniente para el aluvión de 1993 (*Google Earth*).

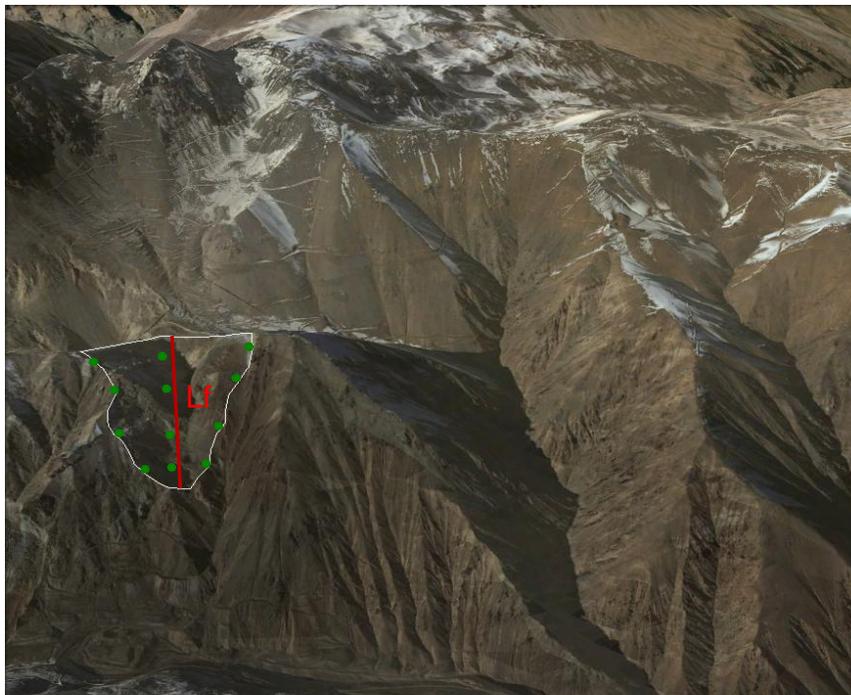


Figura 5-31: Imagen Satelital de la falla en la cuenca de la Quebrada EL Teniente, en rojo, el largo de la falla y en verde, los puntos utilizados para el cálculo de la profundidad de la falla (*Google Earth*).

La falla en la Quebrada El Teniente tiene un largo de 600 metros. Para calcular la profundidad de la falla se obtiene la altura de una grilla de puntos que se presenta en la Figura 5-31. Por diferencia de alturas se obtiene la profundidad de la falla a lo largo del talud (Tabla 5-1).

Tabla 5-1: Cálculo de la profundidad de falla en la Quebrada El Teniente.

Elevación [m]				
Izquierda	Centro	Derecha	Δh Izquierda	Δh Derecha
2947	2861	3001	86	140
2904	2831	2909	73	78
2768	2720	2765	48	45
2700	2680	2709	20	29

La profundidad de la falla disminuye considerablemente hacia aguas abajo del talud, por lo que la falla no presenta características de una falla plana, es decir, el método de talud infinito no es aplicable. Se propone que, al igual que lo observado en las experiencias experimentales, la condición de borde de aguas abajo de la falla rompe con la consideración de que el flujo subsuperficial es paralelo a la pendiente del talud ya que el nivel freático se inclina, y esta inclinación del nivel freático genera una falla cuya profundidad varía a lo largo del talud.

Capítulo 6

Conclusiones

El estudio desarrollado sobre el inicio de los aluviones desencadenados por un flujo subsuperficial, es representativo de eventos iniciados en taludes de largo y profundidad acotada y donde la dinámica del flujo subsuperficial genera un nivel freático no paralelo a la pendiente topográfica. Esta última condición impide analizar la estabilidad de ladera con el método de talud infinito, utilizado comúnmente en estudios de esta área, ya que, ese modelo, considera un flujo subsuperficial paralelo a la pendiente topográfica.

La inclinación del nivel freático en el momento de la falla es un indicador de la zona saturada del talud y se relaciona con la densidad inicial del suelo. Mientras mayor es la densidad inicial del suelo, mayor es el ángulo de inclinación del nivel freático, por lo que mientras mayor densidad inicial presenta el suelo se requiere una mayor área saturada, es decir, una mayor presión de agua para que se desestabilice el suelo y se genere la falla.

Cuando el flujo subsuperficial comienza a pasar a través de un suelo, éste se va saturado y elevando el nivel freático. La altura que alcance el nivel freático y el punto donde aflora a la superficie se relaciona con el grado de compactación del suelo. En el caso de suelo suelto, el ingreso del flujo a la muestra y la elevación del nivel freático generan un reacomodo de las partículas que detiene la evolución del nivel freático y el flujo alcanza el nivel superficial en la zona de aguas abajo, dejando un importante porcentaje del suelo no saturado. La falla ocurre en la zona no saturada, ya que la base de la zona en movimiento coincide con el nivel freático. En el caso de suelo medio y suelo denso, no existen movimiento previos a la falla, el nivel freático alcanza alturas mayores y aflora a la superficie en la zona central o de aguas arriba de la falla. La zona de falla incorpora tanto la zona saturada como la no saturada.

Para que la falla inicial se convierta en un aluvión se requiere que la masa de suelo que falla presente cierto porcentaje mínimo saturado, el cual se alcanzó tanto en densidad media como en densidad máxima, pero no en densidad mínima, donde la falla no se convirtió en aluvión. Luego, existe una densidad límite que permite que el nivel freático se eleve y la zona en movimiento cumpla la condición de saturación mínima. Esta densidad límite se encuentra entre la densidad mínima y la densidad media estudiadas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la muestra de suelo estudiada es una muestra alterada, por lo que, en estado natural puede presentar cierto ordenamiento o distribución de las partículas que

aumente su capacidad de resistencia al paso del flujo subsuperficial, por lo que el valor de la densidad límite, es solo una estimación.

La forma de la falla y localización de la falla también se relaciona con la densidad del suelo. En el caso de suelo medio y suelo denso, la falla ocurre en la zona donde aflora el nivel freático. Mientras más compacto el suelo, la falla abarca una mayor área superficial e incorpora la zona saturada y no saturada. En el caso de suelo suelto, la zona superficial saturada es mínima y la falla ocurre en la zona no saturada. Es decir, se ubica en la zona aguas arriba de donde aflora el flujo subsuperficial y la profundidad queda determinada por la altura del nivel freático.

El grado de estabilidad o inestabilidad de la ladera está dada por la condición de pendiente y las propiedades intrínsecas del tipo de suelo que determinan su capacidad de resistencia al corte (ángulo de fricción interna y cohesión). Sin embargo, la presencia del flujo subterráneo genera presión de poros y aumenta el peso del suelo disminuyendo la estabilidad de la ladera. El suelo falla cuando se alcanza la condición de inestabilidad y los esfuerzos solicitantes son mayores a los resistivos. La pendiente del talud, juega un rol fundamental en el volumen de remoción, a mayor pendiente mayor volumen de remoción. Al modelar las condiciones del talud en el inicio de la falla, se corroboró, que en todas las experiencias el Factor de Seguridad se encontraba entre 1.23 y 0.8, lo que indica que la ladera había alcanzado la condición inestable.

Al comparar los resultados obtenidos con experiencias similares, al igual que Reid (2007) se concluye que la licuefacción parcial provocada por la saturación del suelo es determinante en el paso de la falla al aluvión propiamente tal. Iverson (1997) propone que para que se genere esta licuefacción parcial se requiere un cohesión tal que mantenga la estabilidad de la ladera hasta que el material que falle se encuentre saturado o parcialmente saturado, a partir de lo cual, se concluye que en el caso de densidad mínima (suelo suelto), la muestra no presentaba esta cohesión mínima por lo que la falla ocurre en suelo no saturado y la remoción posterior es mínima. La falla en suelo medio y suelo denso presenta elementos comunes a los mencionados por Iverson et al. (1997) para fallas en suelo denso, ya que describe que la masa de suelo en movimiento se encuentra parcialmente saturada y se genera un falla retrogresiva que se inicia con un deslizamiento aguas abajo y que luego se propaga hacia aguas arriba tal como se observó, por ejemplo, en el caso de densidad máxima con pendiente 38° y densidad máxima con pendiente 43°.

Cuando el suelo tiene densidad inicial media (~1700kg/m³) o máxima (~1800 kg/m³) la falla es de superficie circular, e inicia con una grieta superficial que determina el largo de la falla. Cuando el suelo presenta densidad mínima (~1600 kg/m³) el nivel freático aflora cerca de la pared transversal de aguas abajo, y la zona en movimiento, incorpora toda la superficie aguas arriba de este punto, en ausencia de la grieta mencionada en los casos anteriores, por lo que es el largo del canal acota la extensión de la falla. Este elemento acerca a la falla observada a la falla propuesta en el método de talud infinito, más aun considerando que en suelo suelto (densidad inicial mínima) la inclinación del nivel freático es menor que en los otros casos.

Iverson et al. (1997) generó aluviones bajo condiciones controladas y observó que cuando el suelo tenía densidad inicial igual a 1400 kg/m³, el nivel freático se mantenía paralelo a la pendiente topográfica hasta que se generaba la falla, la cual se extendía en todo el largo y alto del canal. En el caso de suelo con densidad inicial igual a 1600 kg/m³, el nivel freático presentaba una inclinación y la falla era de superficie circular y largo acotado. A partir de esto, postula que esta diferencia se debe a la densidad inicial del suelo, planteando que una

mayor densidad del suelo inhibe el proceso de propagación de la falla. Este mismo fenómeno se aprecia al comparar la falla de suelo y la falla de suelo medio, descritas en capítulos anteriores. Sin embargo al incorporar los datos obtenidos en el caso de falla en suelo denso, donde la falla se propagó en mayor medida que en densidad media, se concluye que lo propuesto por Iverson (1997) no aplica al momento de comparar la falla en suelo medio con la falla en suelo denso. Es por esto que se propone que los factores que determinan la aparición de una falla rotacional, de superficie circular y largo acotado es la presencia de flujo subsuperficial inclinado y la densidad inicial mayor a una densidad límite. A partir de la cual, la falla es más extensa a medida que aumenta la densidad inicial. Sin embargo esta densidad límite va a depender del tipo de material.

La zona de estudio, la cuenca alta del Rio Cocha, está formada por laderas de pendientes que alcanzan el 50%. Al conocer esta condición, es esperable, que las fallas en la zona generen un importante volumen de remoción, ya que, en los resultados obtenidos, se observa que la pendiente de la ladera es el principal factor determinante en la profundidad de la falla y en el volumen de remoción. A partir de imágenes satelitales, se comprobó, que en terreno existen huellas de fallas en taludes acotados, por lo que es válido el estudio experimental desarrollado. Del análisis adimensional, se concluye que la densidad inicial del suelo, en el caso de fallas ocurridas en taludes acotados, es determinante en el tipo de falla que podría ocurrir. Ya que permite tener una idea de la ubicación del falla (ubicación del centro de la falla con respecto a la ubicación de la condición de borde aguas abajo), de la dimensión máxima de la falla (profundidad de la falla y largo de la falla) y la condición de saturación de la masa de suelo en movimiento. Sin embargo, se requiere conocer la topografía de la zona y sus singularidades.

Para próximos estudios se recomienda disminuir la profundidad del canal, de tal manera de que la configuración del canal sea cercana a la condición de talud infinito ya que este modelo supone que la profundidad de la falla es aproximadamente 25 veces el largo de la falla, y , más aun, que la profundidad de la falla coincide con la altura del estrato de suelo que se encuentra sobre la base rocosa, lo cual es imposible de generar con la configuración actual, donde el largo del canal es 3.3 veces la profundidad. Esto permitiría estudiar si la configuración del canal afectó la dinámica del flujo subsuperficial induciendo un nivel freático inclinado y si es posible mantener el nivel freático paralelo y generar una falla plana paralela a la pendiente topográfica y de toda la profundidad del canal Y así, comparar la superficie de falla que se genera con la ya observada. Las densidades recomendadas son entre densidad mínima y densidad media, con el fin de definir la densidad límite que determine cuando se alcanza la condición de saturación para el posterior aluvión y cuando no.

También sería interesante controlar el caudal afluente de tal manera que a partir de eventos de precipitación registrados y simulados en algún modelo hidrológico, obtener el caudal subsuperficial esperado y recrearlo bajo condiciones controladas. Los sensores de presión debiesen ser más sensibles y medir en un rango más amplio, ya que al saturarse se perdía información relevante de la dinámica de la presión de agua. Más aún sería interesante instalar sensores a diferentes alturas para detectar variaciones locales de la presión de agua y de la humedad del suelo.

Bibliografía

AC Ingenieros Consultores Ltda. (1993) Estudio Técnico del Aspecto Fluvial de los Ríos Coya y Teniente y su incidencia en el complejo La Junta.

Adrian R. (1991). Particle-Image techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of fluid mechanics*, 23(1), 261-304.

APR Ingeniería S.A. (2008)a. Informe técnico de soluciones de protección ribera izquierda frente a Adit 71. Diagnóstico aluvión de mayo 2008.

APR Ingeniería S.A. (2008)b. Informe Ingeniería Básica.

Blijenberg, H., De Graaf, Hendricks, M., De Ruiter, J., Van Tetering, A. (1996). Investigation of infiltration characteristics and debris flow initiation conditions in debris flow source areas using a rainfall simulator. *Hydrological Processes*, 10(11), 1527–1543.

Borga M., Dalla Fontana G., DaRos D., Marchi L., (1998). Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data. *Environmental Geology* 35(2-3): 81-88.

Bovis, M. J. y Dagg, B.R. (1987). Mechanisms of debris supply to steep channels along Howe Sound, southwest British Columbia. *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim (Proceedings of the Corvallis Symposium)*, 165, 191-200

Casadei, M., Dietrich, W.E., Miller, N.L., (2003). Experimenting a model for predicting the timing and location of shallow landslides initiation in soil-mantled landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 925–950.

Casagrande, A. (1940). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. *Contribution to Soil Mechanics*, 1925-1940.

Gabet, E., Mudd, S. (2006). The mobilization of debris flows from shallow landslides. *Geomorphology*, 74(1), 207-218.

Golder Associates S.A. (2001). Informe sobre Vulnerabilidades ante Riesgo de Aluviones en el sector Adit 71.

Golder Associates S.A. (2009). Vulnerabilidad ante riesgo de aluviones en sectores ADIT 71 y Quebrada Los Sapos, Mina El Teniente, Chile. Informe Fase 3.

Iverson, R. (1997). The physics of debris flow. *Reviews of geophysics*, 35(3), 245-296.

- Iverson, R. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36(7), 1987-1910.
- Iverson, R., Reid, M., LaHusen, R. (1997). Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 25(1), 85-138.
- Iverson, R., Reid, M., Iverson, N., Lahusen, R., Logan, M., Mann, J., Brien, D. (2000). Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity. *Science*, 290(5491), 513-516.
- Iverson, R.M. (2005). Regulation of landslide motion by dilatancy and pore pressure feedback. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003-2012), 110(F2).
- Iverson, R.M., y Major, J.J. (1987). Rainfall, groundwater flow, and seasonal movement at Minor Creek landslide, northwestern California: Physical interpretation of empirical relations. *Geological Society of America Bulletin*, 99(4), 579-594.
- Iverson, R.M. y Reid, M.E. (1992). Gravity-driven groundwater flow and slope failure potential: 1. Elastic effective-stress model. *Water Resources Research*, 28(3), 925-938.
- Johnson, A.M. y Rahn, P.H. (1970). Mobilization of debris flows. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 9, 168-186.
- Johnson, A.M. y Rodine, J.R. (1984). Debris Flow in Brunnsden, D. y Prior, D.B. (Eds), *Slope Instability*. Wiley, London, 257-361.
- Lanni, C., McDonnell, J.J., y Rigon, R. (2011). On the relative role of upslope and downslope topography for describing water flow path and storage dynamics: a theoretical analysis. *Hydrological Processes*, 25(25), 3909-3923.
- Lanni, C., McDonnell, J., Hopp, L. and Rigon, R. (2012). Simulated effect of soil depth and bedrock topography on near-surface hydrologic response and slope stability. *Earth surface processes and landforms*.
- Lara, M., Sepúlveda, S. (2009). Landslide susceptibility and hazard assessment in San Ramón Ravine, Santiago de Chile, from an engineering geological approach. *Environmental Earth Sciences*, 60(6), 1227-1243.
- Milledge, D.G., Griffiths, D.V., Lane, S.N., Warburton, J. (2012). Limits on the validity of infinite length assumptions for modelling shallow landslide, *Earth Surface Processes and Landforms* 37(11), 1158-1166.
- Mitchell, J.K. y Soga, K. (1976). *Fundamental of soil Behavior* (p.422). New York: Wiley.
- Montgomery, D. R., W. E. Dietrich, (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding, *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171.
- O'loughlin, E. M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchment by topographic analysis, *Water. Resources Research*, 22(5), 794-804.
- Pierson, T.C. y Scott K.M. (1985). Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research* 21(10), 1511-1524.
- Reid, M., LaHusen, R., Iverson, R. (1997). Debris-flow initiation experiments using diverse hydrologic triggers. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, 1-11.

Skempton, A.W. (1984). Residual strength of clays landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique* 35:3-18

Takahashi, T. (2009). A review of Japanese debris flow research. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 2(1), 1- 14.

Thielicke, William; Stamhuis, Eize J. Stamhuis. PIVLab, herramienta para el análisis de la velocidad de las partículas mediante imagen programada para Matlab. <http://pivlab.blogspot.com/>