

# Review of Researches on Instability of Soil Retaining Structures Induced by Rainfall

José Carlos Solís Tito<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú.

**Abstract**– The reasons why retaining structures may collapse due to heavy rains are similar to the reasons why landslides are triggered, taking into account that generally retaining structures are built to stabilize slopes or embankments. In addition, both the collapse of these structures, as well as landslides, can cause damage to surrounding infrastructure, property, and even to people near the fault zone. In the technical literature there are different types of research on case studies, alternatives to control the collapse of retaining structures induced by rains, associated with slope instability, which would have triggered landslides due to heavy rainfall, establishing alternatives for analysis, control and prevention to mitigate the disasters associated with this type of phenomena. This article aims to review and present research on case studies on the analysis, control and remediation of collapse of containment structures, as well as landslides, both triggered by rainfall, which are published in different specialized articles; therefore, different studies on the subject are presented in a summarized form, grouped into categories that cover different research, study, evaluation, analysis, validation, and monitoring methods. The categories considered are: A. Numerical analysis, B. Physical models, C. In situ tests – geophysical tests, D. Evaluation of rainfall, and E. Monitoring systems, so that they can be consulted in an organized way.

**Keywords**– Instability assessment, Collapse of retaining structures, Landslide, Rainfall, Case studies.

# Review of Researches on Instability of Soil Retaining Structures Induced by Rainfall

José Carlos Solís Tito<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú.

**Resumen—** Las causas por las que las estructuras de contención pueden colapsar debido a lluvias intensas, son similares a las razones por las que se desencadenan los deslizamientos de tierra, teniendo en cuenta que generalmente las estructuras de contención se construyen para estabilizar laderas o taludes. Además, tanto el colapso de estas estructuras, así como los deslizamientos de tierra pueden producir daños a infraestructura aledaña, al patrimonio, e inclusive a las personas próximas a la zona de falla. En la literatura técnica se tienen distintos tipos de investigaciones sobre estudios de casos, alternativas de control del colapso de estructuras de contención inducidos por las lluvias, asociado estos con inestabilidad de laderas, que habrían desencadenado en deslizamientos por efecto de precipitaciones intensas, estableciéndose alternativas de análisis, control y prevención para mitigar los desastres asociados a este tipo de fenómenos. Este artículo, tiene como objetivo revisar y presentar investigaciones respecto a estudios de casos sobre el análisis, control y remediación sobre colapso de estructuras de contención, así como deslizamientos de tierra, ambos desencadenados por las precipitaciones pluviales, los cuales están publicados en diferentes artículos especializados; por lo que, se presenta, en forma resumida, distintos estudios al respecto, agrupados en categorías que abarcan distintos métodos de investigación, estudio, evaluación, análisis, validación, y monitoreo. Las categorías consideradas son: A. Análisis numérico, B. Modelos físicos, C. Ensayos in situ – ensayos geofísicos, D. Evaluación de la precipitación pluvial, y E. Sistemas de monitoreo, para que pueda ser consultada de forma organizada.

**Palabras clave—** Evaluación inestabilidad, Colapso de estructuras de contención, Deslizamiento de tierra, Precipitación pluvial, Estudios de casos.

de un muro aumenta la carga sobre este; así mismo, las lluvias intensas pueden provocar erosión del suelo, lo que provoca la pérdida del suelo, reduciéndose la estabilidad del muro de contención y aumentándose el riesgo de falla [3].

En el presente artículo se revisa diversas investigaciones que abarcan el análisis de muros de contención colapsados y deslizamientos de laderas de tierra, ambos debido al efecto de la lluvia. También se presentan diversos factores que afectan y condicionan la estabilidad, concentrándose principalmente en la precipitación pluvial; así mismo, se presentan ensayos de campo y laboratorio para su evaluación. El objetivo de la revisión es proporcionar una referencia para las partes interesadas y los investigadores que actualmente trabajan o buscan trabajar respecto al colapso de estructuras de contención debido a precipitaciones pluviales. Los estudios de casos disponibles en la bibliografía especializada corresponden a investigaciones sobre análisis, alternativas del control y remediación de inestabilidad, en estructuras de contención, inducida por precipitación pluvial intensa, considerando avances tecnológicos y científicos en el control de la estabilidad de estructuras de contención; así como, la inestabilidad de laderas desencadenado por el efecto de las lluvias, las cuales permiten entender el mecanismo de falla, para implementar sistemas de prevención que permitan controlar la inestabilidad de sistemas de contención, así como en laderas, los cuales podrían adoptarse para la remediación de este tipo de problemas en distintos tipos de proyectos de ingeniería.

## I. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra son uno de los desastres naturales más devastadores y recurrentes que han afectado a varias regiones montañosas en todo el mundo; esto se refleja en el conjunto de datos mundial sobre deslizamientos de tierra, en los que, la mayoría de los deslizamientos de tierra son provocados por las lluvias [1]. Una consecuencia de los deslizamientos de tierra desencadenados por precipitación es el colapso de elementos estructurales, como estructuras de contención en áreas propensas a deslizamientos de tierra; ya que las estructuras cercanas o ubicadas en zonas vulnerables a los deslizamientos de tierra tienen mayor probabilidad de colapsar debido a deslizamientos de tierra inducidos por la lluvia [2]. Por otra parte, una de las causas más comunes de colapso en los muros de contención debido a lluvias intensas es el drenaje deficiente, debido a que el agua acumulada detrás

## II. METODOLOGÍA

La presente investigación corresponde a una revisión bibliográfica de investigaciones sobre la inestabilidad de estructuras de contención del suelo inducida por las precipitaciones pluviales, que se desarrolló de acuerdo a un enfoque cualitativo.

Las investigaciones consultadas se identificaron y seleccionaron considerando su relevancia en cuanto a la temática respecto a la mecánica de suelos no saturados, instrumentación de campo y laboratorio, modelos numéricos que abordan el análisis, control y remediación del colapso de estructuras de contención e inestabilidad de laderas, desencadenados por la precipitación pluvial. Se consideró principalmente investigaciones publicadas en revistas científicas teniendo en cuenta como criterio de inclusión la

temática abordada, sin restringir la información en cuanto a la antigüedad de su publicación.

Para poder clasificar la información de las investigaciones consultadas respecto a colapso en estructuras de contención, así como inestabilidad de lateras, inducida por precipitación pluvial intensa, se consideró como referencia la clasificación de las estrategias de investigación para sistemas de prevención de fallas de taludes debido a lluvias intensas [4], donde se plantea los siguientes métodos de investigación: 1) pruebas de laboratorio, 2) simulaciones numéricas, 3) pruebas en modelo físico de filtración y falla, 4) mediciones de campo de succión y precipitación y 5) ensayos in situ para la identificación de características geológicas y geotécnicas del talud. Así mismo, se tomó como referencia la revisión de literatura desarrollada por Segoni, et al. (2018) [5] donde se presentan estudios en los cuales se revisaron distintas publicaciones, destacando los avances significativos y temas críticos en la estabilidad de taludes con influencia de las precipitaciones, los cuales permitieron la definición de niveles de advertencia en los sistemas de alerta temprana frente a deslizamientos.

A continuación, se presentan en forma resumida distintos estudios sobre investigaciones respecto al análisis, control y remediación de colapso de estructuras de contención; así como, inestabilidad de laderas, inducidos por precipitación pluvial, agrupados en distintas categorías que abarcan distintos métodos de investigación, evaluación y monitoreo. Las categorías establecidas son: A. análisis numérico, B. modelos físicos, C. ensayos in situ – ensayos geofísicos, D. evaluación de la precipitación pluvial, E. sistemas de monitoreo, para que pueda ser consultada de forma organizada.

#### A. Análisis Numérico

Un primer caso (A1), que aborda el análisis, lo constituye el análisis numérico de la falla de una estructura de contención modular anclado de 24 m de longitud por efecto de la precipitación (Fig. 1), ubicado en la localidad de Queensland (Australia), el cual falló durante un evento de lluvia extrema, lo cual permitió plantear medidas correctivas para la sección colapsada, mediante los resultados de análisis previos. Para obtener los parámetros de diseño, se utilizó el retro-análisis de la sección fallada, utilizando la mecánica del suelo saturado con el nivel del agua a la altura más alta del muro, considerando la falla en una sola etapa, resultando como medida de remediación, el reemplazo de parte del muro visiblemente intacto; mientras que, otra alternativa que consideró el empleo de la mecánica del suelo no saturado, y un enfoque de falla por etapas conlleva a una conclusión diferente, en la que el muro intacto no requeriría de estabilización [6].



Fig. 1 Sector de retroanálisis del muro en zona fallada. Adaptado de [6].

Un segundo caso (A2), que aborda el análisis, lo constituye un análisis numérico asociado a un análisis de precipitación, que consistió en la evaluación preliminar de la inestabilidad de taludes, en una localidad de Malasia, inducida por la lluvia, integrando el análisis estadístico de la lluvia y las propiedades intrínsecas del suelo no saturado, lo cual permitió desarrollar el modelo numérico para el estudio del derrumbe de taludes inducido por la lluvia, que se denominó PERISI, el cual utiliza la precipitación extrema de un determinado período de retorno, considerando parámetros del suelo no saturado y parámetros de patrón de lluvia [7].

Un tercer caso (A3), que aborda el análisis, constituye el desarrollo de un modelo numérico, validado mediante resultados de pruebas en modelos físicos de taludes instrumentados, los cuales fueron desarrollados mediante investigaciones experimentales para determinar los factores que influyen en el inicio del colapso de taludes. Para el análisis numérico de la filtración transitoria se utilizó el método de elementos finitos (Fig. 2), considerando una intensidad de lluvia de 40 mm/h, un flujo de agua de  $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$  para simular la condición de lluvia artificial durante la prueba del modelo. La condición inicial de presión de agua intersticial del talud se definió utilizando una función espacial de la presión de agua intersticial utilizando los datos recuperados de las lecturas del transductor de presión de agua intersticial del modelo físico [8].

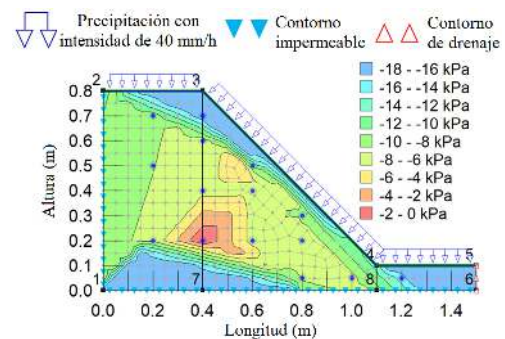


Fig. 2 Condición de presión de agua intersticial inicial definida para el análisis numérico del modelo instrumentado con pendiente de 45°. Adaptado de [8].

#### B. Modelos Físicos

Un primer caso (B1), que aborda el análisis, lo constituye un estudio mediante modelos físicos que consistió en la instrumentación de tres modelos de taludes sometiéndolos a

lluvia artificial para investigar los efectos de la inclinación del talud en la estabilidad y el mecanismo de falla de los taludes inducido por la lluvia (Fig. 3). La investigación consistió en examinar los modelos físicos mediante observación visual del proceso de falla, la medición de la variación temporal de los contenidos volumétricos de humedad del suelo, las presiones intersticiales y la deformación de los taludes durante la aplicación de lluvia artificial [8].

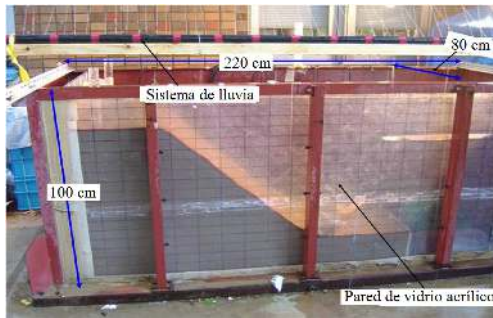


Fig. 3 Caja modelo utilizada para las pruebas de los modelos físicos. Adaptado de [8].

Un segundo caso (B2), que aborda el análisis, lo constituye un estudio que consistió en el análisis de pendientes mediante el desarrollo de pruebas en un modelo físico de laboratorio, constituido por una columna de suelo (Fig. 4), para establecer relaciones entre el contenido volumétrico de agua, grado de saturación, succión y el coeficiente de conductividad hidráulica en condiciones no saturadas, bajo diferentes condiciones de lluvia y con la variación del tiempo [9].

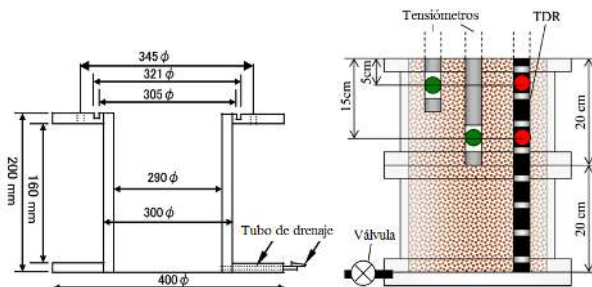


Fig. 4 Configuración del modelo de prueba. Adaptado de [9].

### C. Ensayos In Situ – Ensayos Geofísicos

Un primer caso (C1), que aborda el control, lo constituye la evaluación de posibles causas de colapso mediante la ejecución de ensayos geofísicos. El estudio desarrollado habría permitido evaluar los daños ocurridos en los muros de la tercera terraza (zona central) de la Fortaleza de Sacsaywaman (Fig. 5); donde algunos muros colapsaron, determinándose que la principal causa fue el empuje lateral ocasionado por exceso de la cantidad de escorrentía producto de las precipitaciones y la presencia de movimientos sísmicos. Así mismo, los resultados de los ensayos geofísicos habrían permitido determinar evidencias de presencia de muros incas y terrazas enterradas, importantes para mejorar el sistema de

drenaje las cuales permitirían prevenir el colapso de los muros en la tercera terraza [10].



Fig. 5 Muro inca colapsado. Adaptado de [10].

En un segundo caso (C2), que aborda el control, se indica que la investigación del subsuelo, como el caso de ensayos geofísicos, es ideal a escala local y cumpliría con las demandas locales, pero sería difícil de manejar a largo plazo debido a los altos costos de instalación y operación. Así mismo, en secciones donde el problema de deslizamientos de tierra es inmenso, el monitoreo con instrumentos, tales como los usados en ensayos geofísicos, sería necesario ya que la región sería altamente vulnerable y las imágenes satelitales con la resolución disponible actualmente podrían no ser capaces de identificar con precisión las secciones planas de falla [1].

### D. Evaluación de la Precipitación Pluvial

Un primer caso (D1), que aborda el análisis, lo constituye la evaluación de la precipitación pluvial que condujo al colapso de estructuras, en el cual se habría definido objetivamente los umbrales, lo cual consistió en la revisión de literatura respecto a procedimientos estándar para la identificación de eventos de lluvia [5]; para lo cual, se habría recopilado información sobre umbrales de lluvia agrupándolos de acuerdo a sus características en cuatro categorías: detalles de publicación, distribución geográfica y usos, características del conjunto de datos, definición del umbral.

Un segundo caso (D2), que aborda el análisis, consistió en el desarrollo de un sistema regional de evaluación de peligros basado en la precipitación medida y la relación precipitación-falla. Para lo cual, realizaron pruebas de laboratorio e investigaciones de campo en cuatro valles de la prefectura de Hiroshima, considerados como zonas potencialmente peligrosas. Como objetivo tenían planteado mejorar el sistema de evaluación de peligros disponible para la prefectura de Hiroshima [9].

Un tercer caso (D3), que aborda el análisis, lo constituye un estudio en que determinaron los patrones críticos de lluvia para suelos típicos de una localidad de Malasia; para lo cual, presentaron el análisis de patrones críticos de lluvia para 04 tipos típicos de suelo utilizando los programas de cómputo Seep/W y Slope/W [7].

Un cuarto caso (D4), que aborda el análisis, lo constituye una investigación, desarrollada en los municipios de Ubatuba,

Campos do Jordão y São José dos Campos, ubicados en el estado de São Paulo (Brasil), los cuales son reconocidos por tener un elevado número de deslizamientos registrados en laderas y terraplenes. Para la investigación se habría desarrollado el análisis de la lluvia, humedad y temperatura del suelo, mediante investigaciones de campo, para formular una hipótesis sobre el mecanismo de ruptura predominante y el papel de cada variable monitoreada en la deflagración de deslizamientos de suelo que ocurrieron en los tres municipios mencionados. Del estudio determinaron que la intensidad horaria de lluvia y/o la acumulación de lluvia durante 24 y/o 72 h fueron responsables de la deflagración de los deslizamientos ocurridos en las áreas estudiadas, junto con las restricciones antrópicas existentes en las áreas de riesgo [11].

#### E. Sistemas de Monitoreo

Un primer caso (E1), que aborda la remediación, lo constituye el planteamiento de un sistema remoto de control de deslizamientos, en la localidad de Volterra, el cual se trata de un sistema de teledetección para los muros urbanos (Fig. 6), en la zona sureste, el cual brindaría alerta a la autoridad pública en caso de sospechas de un evento catastrófico inminente; considerando que la intervención debe dirigirse no solo a la restauración estética sino en particular a una estabilización estructural de los muros. Para el colapso evaluado se destacó la necesidad de detectar evidencias de descomposición, como signos de humedad, sobrecarga y presencia de drenaje, para introducirlos en el análisis de vulnerabilidad. Así mismo, consideraron que, en el campo de la protección del patrimonio histórico existente, es fundamental disponer de un sistema de seguimiento permanente, para infraestructuras, con el fin de garantizar la seguridad de la vida humana junto con la protección del patrimonio cultural [12].



Fig. 6 Vista después del derrumbe en San Gimignano. Adaptado de [12].

En un segundo caso (E2), que aborda la remediación, se indica que la ocurrencia de deslizamientos de tierra debido a eventos de lluvia abrupta o eventos sísmicos podría prevenirse mediante el monitoreo, el cual puede clasificarse en tres tipos: 1. Observación de los cambios de topografía y grietas en la superficie durante la investigación del sitio, la cual es una técnica de monitoreo tradicional utilizada en periodos de tiempo regulares; sin embargo, su principal limitación es que no proporciona las variaciones para un intervalo de tiempo

corto y es difícil determinar con precisión el momento y la ubicación de futuras incidencias de deslizamientos de tierra. 2. Técnicas de teledetección como análisis de imágenes satelitales, interferometría de radar de apertura sintética (SAR) GPS y detección y medición de distancias por luz (LiDAR). Estos métodos pueden ser útiles ya que pueden medir el desplazamiento de la pendiente en un área grande independientemente de las condiciones climáticas. 3. Observación terrestre in situ del movimiento de la pendiente utilizando varios instrumentos (extensómetros e inclinómetros) e instalación de pluviómetros para acumular datos de lluvia locales [1].

### III. RESULTADOS

A continuación, se presentan en forma resumida algunos resultados de los distintos estudios sobre investigaciones respecto al análisis, control y remediación de colapso de estructuras de contención; así como, inestabilidad de laderas, inducidos por precipitación pluvial, que han sido consultados.

#### A. Análisis Numérico

En el primer caso (A1), correspondiente al análisis numérico de la estructura de contención ubicado en la localidad de Queenslan; el modelo considerando la mecánica de suelos saturados con un nivel freático alto conservador y la falla en una sola etapa condujo a un factor de seguridad menor a 1.2 para la sección intacta del muro existente, lo cual sugeriría su demolición y reemplazo (Fig. 7a). Mientras que al cambiar la falla en una sola etapa a una falla en varias etapas (progresiva) condujo a un factor de seguridad de 1.3 para la sección intacta del muro existente en una condición extrema, lo cual sería aceptable para un muro existente pero inaceptable para un muro nuevo (Fig. 7b). Por otra parte, al considerar la mecánica de suelos no saturados con una pérdida de succión del suelo condujo a un factor de seguridad de 1.6 para la sección intacta del muro existente en una condición extrema, lo cual sugeriría que el muro es aceptable (Fig. 7c). De los resultados presentados, a pesar de ser distintos, el modelo considerando la falla en etapas y una mecánica de suelos no saturados habría sido realista [6].

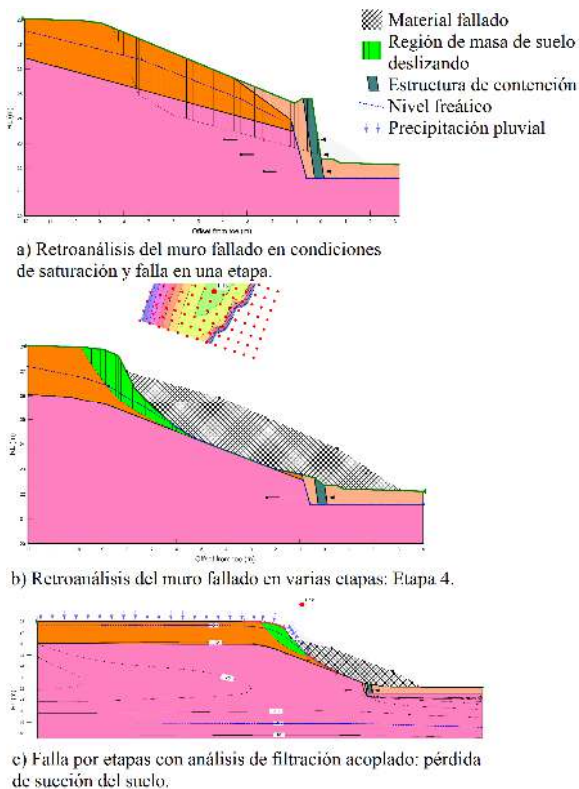


Fig. 7 Superficies de falla para los diferentes tipos de análisis desarrollado. Adaptado de [6].

En el segundo caso (A2), correspondiente al desarrollo de simulaciones numéricas para evaluar el efecto de la precipitación en una región de la península de Malasia, se determinó que la relación de intensidad de lluvia y la permeabilidad saturada del suelo ( $I/k_{sat}$ ) juega un papel decisivo en la determinación del patrón crítico de precipitaciones. Para suelos con  $I/k_{sat} < 1$ , la precipitación con la mayor intensidad y la duración más corta es el patrón crítico de precipitación. En cuanto a los suelos con  $I/k_{sat} > 1$ , la precipitación con la duración más larga es el patrón crítico de precipitación; lo cual permite entender la importancia de capacidad de infiltración del suelo. Además, considerando el concepto de lluvia extrema y las relaciones únicas entre las características de lluvia extrema (curva IDF), función de permeabilidad y curva característica suelo-agua (SWCC) habrían desarrollado el modelo PERISI, que se puede utilizar para estimar la profundidad crítica del frente de humectación y el valor mínimo de succión para el cálculo del factor de seguridad de una pendiente de suelo homogéneo [7].

Para el tercer caso (A3), en el cual las pendientes del modelo físico instrumentado presentaban inclinaciones de 30, 45 y 60 se habrían analizado numéricamente para fines de validación del modelo numérico. El modelo numérico desarrollado se validó utilizando los historiales temporales de presión de agua intersticial medidos y simulados. En la investigación se observó una concordancia razonable entre las presiones de agua intersticial medidas y simuladas. Además, la

variación del Factor de Seguridad (FS) mostró una correlación razonable con la variación de succión y el inicio de fallas reales de las pendientes del modelo instrumentado se adhirió estrechamente a los valores del FS simulados, demostrándose la importancia de la teoría la mecánica de suelos no saturados. Además, la posición de las superficies de falla y los volúmenes de masa deslizante de los taludes del modelo instrumentado de 30 y 60 se emplearon en el proceso de verificación del modelo numérico, lo que mostró una sólida concordancia con los resultados del análisis de estabilidad del talud [8].

**Discusión:** En los casos de estudio, respecto al análisis numérico, puede evidenciarse que el análisis puede enfocarse con distinta finalidad, como el análisis paramétrico de estabilidad, la validación del análisis mediante modelos físicos, o el análisis de la precipitación asociado a la inestabilidad. En el caso A1 se resalta la importancia de definir las condiciones iniciales del modelo numérico, bajo las cuales se realizará el análisis, debido a que podría obtenerse distintos resultados, en cuanto a estabilidad; considerando que las condiciones iniciales adecuadas habrían sido considerar la mecánica de suelos no saturados y la falla en varias etapas, lo cual habría conducido a un Factor de Seguridad (FS) de 1.6 para la sección intacta del muro existente. Por otra parte, los modelos numéricos podrían validarse mediante mediciones en modelos físicos, como el caso A3, donde el modelo numérico se validó utilizando los historiales temporales de presión de agua intersticial medidos en modelos físicos; observándose una concordancia entre las presiones de agua intersticial medidas y simuladas. Por otra parte, podría considerarse el análisis numérico de la lluvia; como el caso A2, en el que se habría integrado el análisis numérico de la lluvia a la evaluación de la inestabilidad de taludes, lográndose desarrollar el modelo numérico PERISI para el estudio de derrumbe de taludes inducido por lluvia.

#### B. Modelos Físicos

En el primer caso (B1), correspondiente al estudio de modelos físicos, se determinó que las pendientes con inclinaciones menores o iguales a 1.2 veces el ángulo de fricción del suelo acumulan una presión de agua intersticial positiva significativa en el área de la base durante la lluvia, lo que resulta en una falla lenta y progresiva. Por lo tanto, la infiltración de lluvia por sí sola no sería suficiente para desencadenar dicha inestabilidad de ladera, sino que se requiere el desarrollo de una presión positiva de agua intersticial junto con un aumento en la relación de saturación relacionada con el aumento del nivel freático para que las pendientes suaves desarrollen inestabilidades significativas dentro de la masa del suelo. Para pendientes con inclinaciones mayores a 1.2 veces el ángulo de fricción del suelo, la disminución de la succión es el factor predominante para el inicio de la falla, lo que llevaría a una falla retrógrasiva de ladera. Por lo tanto, tales fallas se iniciarían en condiciones de suelo no saturado [8].

En el segundo caso (B2) se habría realizado una serie de pruebas en un modelo de laboratorio con suelos de Masado (Japón) para examinar la variación del contenido volumétrico de agua y la succión bajo diferentes condiciones de lluvia a lo largo de la columna de suelo, lo cual permitió desarrollar experimentalmente la curva característica del agua del suelo para los suelos de Masado. El contenido volumétrico de agua y la succión se midieron bajo intensidades de lluvia de 5 mm/h, 20 mm/h y 50 mm/h, considerando el drenaje desde el fondo después de la lluvia con el paso del tiempo [9].

**Discusión:** En los casos de estudio, respecto a modelos físicos, se evidencia que estos permiten registrar mediciones, a través de instrumentación en laboratorio, que permiten entender el mecanismo de falla en taludes, como el caso B1, donde se determinó que inclinaciones menores o iguales a 1.2 veces el ángulo de fricción acumulan una presión de agua intersticial positiva significativa en el área de la base, mientras que con inclinaciones mayores a 1.2 veces el ángulo de fricción, la disminución de la succión es el factor predominante para el inicio de la falla. Así mismo, las mediciones permiten evaluar el flujo del agua a través del suelo; como en el caso B2, donde se registró la variación del contenido volumétrico de agua y la succión bajo diferentes condiciones de lluvia, lográndose desarrollar experimentalmente la curva característica del agua-suelo.

### C. *Ensayos In Situ – Ensayos Geofísicos*

En el primer caso (C1), los resultados de mediciones geofísicas, empleando los métodos geofísicos de Análisis Multicanal de Ondas de Superficie (MASW), Análisis de Microtrepidaciones en Arreglo Multicanal (MAM) y la técnica del Georadar habrían permitido determinar los parámetros elásticos de los suelos en el Parque Arqueológico de Saqsayhuamán; además, proporcionaron evidencias de presencia de muros incas y terrazas que se encuentran actualmente enterradas y cuya ubicación es fundamental para mejorar el sistema de drenaje existente y disminuir los esfuerzos que han venido ocasionando el colapso de los muros en la tercera terraza [10].

En el segundo caso (C2), para las investigaciones de pendientes inestables, en el Himalaya [1], se habría utilizado distintos métodos geofísicos; como el Radar de Penetración Terrestre (GPR) y Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D (ERT) para la investigación del deslizamiento de tierra en Uttarakhand [13]. Otra investigación corresponde a la comparación de las dimensiones del deslizamiento observadas en imágenes de Sensor de Auto-escaneo de Imágenes Lineales-4 (LISS-IV) obtenidas desde Satélites de Teledetección de la India (IRS), con la investigación geofísica, utilizando ERT 2D y GPR para el valle del río Kaliganga, lo cual permitió determinar la profundidad y la geometría de la superficie de deslizamiento [14]. En otra investigación utilizaron ERT para comprender el movimiento del subsuelo, para determinar el plano de falla probable del deslizamiento de tierra de Pakhi [15]. Otro estudio geofísico se realizó para evaluar el deslizamiento de tierra de Lanta Khola, para el cual

se utilizó un estudio electromagnético de Frecuencia Muy Baja (VLF) para comprender la estructura del subsuelo; donde los resultados revelaron la presencia de una zona saturada de agua en el nivel del subsuelo del deslizamiento [16].

**Discusión:** En los casos de estudio, respecto a ensayos geofísicos, se manifiesta la importancia de la ejecución de ensayos geofísicos, con fines de evaluación y control del movimiento en masa, como el caso C1, en el que se indica que los resultados de mediciones geofísicas permitieron evidenciar la presencia de muros incas y terrazas enterradas, las cuales serían importantes para mejorar el sistema de drenaje existente. Así mismo, en el caso C2 se señala que la investigación mediante ensayos geofísicos es ideal a escala local, y para deslizamientos grandes, por tratarse de regiones vulnerables, para la evaluación y control del movimiento en masa analizado.

### D. *Evaluación de la Precipitación Pluvial*

En el primer caso (D1), se indica que la mejora en la investigación de umbrales de lluvia consiste en el uso de los avances tecnológicos recientes correspondiente a instrumentos capaces de medir la lluvia con una resolución espacial y temporal cada vez más fina. Los avances en la tecnología satelital y de radar terrestre proporcionan un gran apoyo a la investigación de umbrales de lluvia; sin embargo, el pluviómetro seguiría siendo el instrumento más común utilizado. Las mediciones de lluvia con resoluciones temporales muy finas son útiles en el caso de umbrales basados en la intensidad máxima, mientras que para umbrales basados en la lluvia total del evento o la lluvia acumulada en intervalos diarios (o mayores), la resolución horaria es suficiente. Por lo contrario, en lo que respecta a la resolución espacial, es deseable la mayor densidad posible de mediciones, porque es posible tener mejor en cuenta la variabilidad espacial de los patrones de lluvia, especialmente durante tormentas convectivas que golpean un sistema orográfico complejo [5].

En el segundo caso (D2), para evaluar el efecto de la precipitación se habría desarrollado un análisis de estabilidad en un modelo físico conjuntamente que un análisis de filtración 1D, considerando intensidades de lluvia de 5, 20 y 50 mm/h. Se encontró que los factores de seguridad dependen de la cantidad de lluvia que se infiltra en el suelo no saturado. El factor de seguridad disminuye gradualmente con el desarrollo del Banda con Alto Contenido de Humedad (HMCB) y luego se reduce drásticamente con el desarrollo del nivel freático. Cuanto mayor es la infiltración de lluvia, menor es el factor de seguridad. El mayor factor de seguridad durante la formación del HMCB habría podido deberse a la alta succión dentro de la pendiente [9].

En el tercer caso (D3), los patrones de lluvia considerados en la región tropical de Malasia consistieron en lluvias importantes, lluvias antecedentes y combinación de lluvias antecedentes y lluvias importantes. Las lluvias importantes se definieron como lluvias intensas con una duración menor a 1 día, mientras que las lluvias antecedentes serían las lluvias con

una duración más larga (es decir, de 1 día a 30 días). Además, las lluvias se caracterizan por lluvias cortas e intensas durante todo el año, mientras que las lluvias prolongadas ocurren durante dos estaciones monzónicas, el Monzón del Suroeste de mayo a septiembre y el Monzón del Noreste de noviembre a marzo [7].

En el cuarto caso (D4), los datos climáticos registrados por los sistemas de monitoreo del campo experimental de Campos do Jordão, evidenciaron que la mayor concentración de lluvia ocurrió entre el 01/12/12 y el 30/04/13 (totalizando 1832 mm de precipitación). Estas precipitaciones representaron aproximadamente el 80% de la lluvia total registrada durante todo el período de monitoreo (2334 mm), con una intensidad máxima de lluvia de aproximadamente 30.0 mm/10 min el 15/02/13. El sistema de monitoreo de Campos do Jordão registró los siguientes datos de lluvia: tasas de precipitación acumulada de 51.8 mm/24 h, 52.0 mm/48 h y 62.4 mm/72 h y una tasa de lluvia horaria máxima de 14 mm/h; siendo la lluvia acumulada de 51.8 mm/24 h la más significativa; cuya acumulación aumentó el contenido de humedad del suelo, lo cual habría desencadenado eventos de deslizamientos en Campos do Jordão. Los datos de lluvia durante el período de monitoreo de los campos experimentales de São José dos Campos y Ubatuba, registraron que las mayores concentraciones de lluvia ocurrieron entre el 01/12/12 y el 30/04/13, que totalizaron 1207 y 1806 mm, respectivamente. Es decir, el 76% de la lluvia total registrada en la parcela experimental de São José dos Campos y el 89% de la lluvia total registrada en la parcela experimental de Ubatuba. Las intensidades máximas de lluvia registradas en los campos experimentales de São José dos Campos y Ubatuba fueron de aproximadamente 28.0 mm/10 min el 30/12/12 y 30.8 mm/10 min el 22/02/13, respectivamente. Al inicio de los deslizamientos el 10/01/13, el sistema de monitoreo de São José dos Campos registraron precipitación acumulada de 89.4 mm/24 h, 90.6 mm/48 h y 90.8 mm/72 h, y una precipitación horaria máxima de 56 mm/h. Con base en los datos de lluvia, una acumulación de lluvia de 89.4 mm/24 h con una intensidad de 56 mm/h fue potencialmente correlacionada con la ocurrencia de deslizamientos en São José dos Campos. En cuanto al sistema de monitoreo de Ubatuba, el deslizamiento ocurrido el 01/04/13 en la carretera BR 101 correspondió a la precipitación acumulada de 84.8 mm/24 h, 130.4 mm/48 h y 133.0 mm/72 h y una lluvia horaria máxima de 39.6 mm/h. Para los valores de precipitación acumulada en 24 h se habría producido una diferencia significativa de aproximadamente 40.0 mm (125.0 mm y 84.8 mm, respectivamente) [11].

**Discusión:** En los casos de estudio, respecto a precipitación pluvial, se señala la importancia de la medición de la lluvia tanto en estaciones meteorológicas como en modelos físicos. En el caso D1, se indica que los avances tecnológicos de los instrumentos permiten mediciones con resolución espacial y temporal refinada; sin embargo, se indica que el pluviómetro seguirá siendo el instrumento más utilizado. De igual manera, en el caso D4, se presentan

registros climáticos de sistemas de monitoreo de campo asociados con deslizamientos. Además, en el caso D3, se indica que los patrones de lluvia pueden establecerse como lluvias importantes (con una duración menor a 1 día), lluvias antecedentes (con una duración de 1 día a 30 días) y la combinación de ambas. Por otra parte, respecto a la inestabilidad de laderas por efecto de la precipitación, en el segundo caso D2, se informa que el Factor de Seguridad (FS) depende de la cantidad de lluvia que se infiltra en el suelo no saturado, y disminuye gradualmente con el desarrollo del Banda con Alto Contenido de Humedad (HMCB)

#### *E. Sistemas de Monitoreo*

En el primer caso (E1), que aborda la remediación, se señala que como parte del monitoreo de campo se propuso una selección de las secciones inestables más relevantes con un Sistema de Información Geográfica (SIG), integrando con el estudio in situ (distanciómetro láser, regla métrica, nivel). La aplicación SIG se basó en la superposición del shapefile con imágenes de Google Earth. Con la ayuda del SIG, es posible asociar a cada etiqueta información correspondiente a: distancia absoluta desde los puntos iniciales, distancia relativa, coordenadas topográficas, altimetría. Además, para secciones contiguas con características similares, los datos se extrapolaron a partir del más cercano. A partir de un análisis visual de las fotografías aéreas y de un estudio realizado a lo largo de las paredes, se pudo observar que parte de las paredes están incorporadas a edificios o están interrumpidas por puertas, lo que complico el estudio automático. El estudio in situ tuvo como objetivo obtener la información geométrica más relevante. La pendiente del paramento de aguas arriba y aguas abajo se midió con la ayuda de un nivel, junto con la pendiente del terreno. Esta información también se pudo deducir a partir del complemento Profile tools en el contexto SIG, a través de la carga del Modelo Digital de Elevación (DEM) raster o, en su ausencia, con mapas LIDAR [12].

En el segundo caso (E2), se indica que, en el caso del Himalaya indio, los estudios de monitoreo incluyeron técnicas de teledetección y observación terrestre [1]. Una de las técnicas utilizadas fue la Interferometría de Dispersión Persistente (PSI) utilizando el satélite ENVISAT para Nainital. La PSI se basa en la técnica InSAR, que utiliza varias imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) y ha demostrado ser exitosa en la identificación de las zonas de deslizamiento en Nainital [17]. Otro sistema de monitoreo corresponde al monitoreo de un deslizamiento de tierra que habría producido un embalsamiento produciendo un lago en Zanskar durante cinco meses utilizando imágenes satelitales multitemporales de alta resolución, el sistema instalado después del evento de deslizamiento permitió describir la variación de la dimensión del lago represado durante el período de monitoreo [18]. Otro sistema de monitoreo constituye el uso de sensores de inclinación a poca profundidad para analizar la variación del ángulo de inclinación del instrumento, que estaría relacionado con el desplazamiento lateral de la pendiente, cuyos resultados

validaron modelos empíricos, que alentaron a realizar estudios similares en otras regiones del Himalaya nororiental, que podrían ayudar a establecer un sistema preliminar de alerta temprana [19], [20]. En la región de India se habrían realizado pocos estudios para el monitoreo e investigación de deslizamientos de tierra; considerando la disponibilidad de sistemas de detección remota, por lo que se sugiere usar datos de alta resolución espacial y temporal, lo cual conduciría a resultados de monitoreo casi en tiempo real; mientras que, en secciones donde el problema de deslizamientos es inmenso, aún se requeriría el monitoreo con instrumentos ya que la región es altamente vulnerable y las imágenes satelitales con la resolución disponible actualmente pueden no ser capaces de identificar con precisión las secciones planas de falla [1].

**Discusión:** En los casos de estudio, respecto a sistemas de monitoreo tanto con instrumentación in situ, así como remoto, se señala las ventajas de este tipo de sistemas, como el caso E1, donde se presenta la relación de la instrumentación in situ con sistemas SIG, y se indica que un sistema remoto de control de deslizamientos podría brindar la alerta a la autoridad pública en caso de sospechas de eventos catastróficos. Así mismo, en el caso E2 se indica que la ocurrencia de deslizamientos debido a la lluvia podría prevenirse mediante el monitoreo, haciendo uso de tecnología satelital y distintos tipos de instrumentos y sensores.

#### IV. CONCLUSIONES

En el presente artículo, se ha revisado brevemente trabajos de investigación sobre colapso de estructuras de contención de suelos, conjuntamente con la inestabilidad de laderas naturales, ambos inducidos por la precipitación pluvial. La información consultada hace referencia a publicaciones especializadas, la cual se clasificó en las categorías: A. análisis numérico (caso A1, caso A2, caso A3), B. modelos físicos (caso B1, caso B2), C. ensayos in situ – ensayos geofísicos (caso C1, caso C2), D. evaluación de la precipitación pluvial (caso D1, caso D2, caso D3, caso D4), E. sistemas de monitoreo (caso E1, caso E2), para que pueda ser consultada de forma organizada.

Por otra parte, la información presentada puede estructurarse considerando investigaciones que abordan estudios sobre el análisis, control y remediación del colapso de estructuras de contención, así como deslizamientos de tierra, ambos desencadenados por las precipitaciones pluviales. Las investigaciones que abordaron estudios sobre el análisis son el caso A1, caso A2, caso A3, caso B1, caso B2, caso D1, caso D2, caso D3, caso D4; las investigaciones que abordaron estudios sobre el control son el caso C1, caso C2, y las investigaciones que abordaron estudios sobre la remediación son el caso E1, caso E2. Por lo que, la información presentada, correspondiente a los distintos casos, es relevante para su aplicación en contextos asociados a la inestabilidad de estructuras de contención inducida por la precipitación pluvial.

#### REFERENCIAS

- [1] Dikshit A., Sarkar R., Pradhan B., Segoni S. y Alamri A. M. (2020) Rainfall Induced Landslide Studies in Indian Himalayan Region: A Critical Review. *Applied Sciences*. Volumen 10.
- [2] Kumar V.S., Chandrasekaran S.S. (2022) Impact Analysis of a Building Collapse Caused by a Rainfall-Induced Landslide in Kerala, India. *Buildings*, Volumen 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12091395>.
- [3] Jetfilter (2022) Retaining Wall Failure Due to Heavy Rains. [jetfiltersystem.com](http://jetfiltersystem.com)
- [4] Kitamura R. y Sako K. (2010) Contribution of "Soils and Foundations" to Studies on Rainfall-Induced Slope Failure. *Soils and Foundations*.
- [5] Segoni S., Piciullo L. y Gariano S. L. (2018) A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*.
- [6] Look B.G. (2016). Different Conclusions for a Retaining Wall Failure with Saturated vs. Unsaturated Soil Mechanics. *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*.
- [7] Lee L.M.; Gofar N. y Rahardjo H. (2009) A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability. *Engineering Geology*.
- [8] Gallage C., Abeykoon T. y Uchimura T. (2020) Instrumented model slopes to investigate the effects of slope inclination on rainfall-induced landslides. *Soils and Foundations*.
- [9] Tsuchida, T.; Athapaththu, A.M.R.G.; Kawabata, S.; Kano, S.; Hanaoka T. y Yuri A. (2014) Individual landslide hazard assessment of natural valleys and slopes based on geotechnical investigation and analysis. *The Japanese Geotechnical Society. Soils and Foundations*.
- [10] Alva H.J.E., Ortiz S.C.E., Pérez Z.A.J. (2015) Mediciones Geofísicas en el Parque Arqueológico de Saqsaywaman. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Civil 2015 – Huaraz, Perú.
- [11] Moreda M.R., Valério F.M. (2015) Real-Time Monitoring of Climatic and Geotechnical Variables during Landslides on the Slopes of Serra do Mar and Serra da Mantiqueira (São Paulo State, Brazil). *Engineering*, Volumen 7. Páginas 140-159.
- [12] Puppino M.L., Vagaggini E., Giresini L., Sassu M. (2020). Large-scale survey method for the integrity of historical urban walls: application to the case of Volterra (Italy). *Procedia Structural Integrity*. Volumen 28. Páginas 330–343.
- [13] Mondal S.K., Sastry R.G., Pachauri A.K., Gautam P.K. (2008) High resolution 2D electrical resistivity tomography to characterize active Naitwar Bazar landslide, Garhwal Himalaya, India. *Current Science*. Volumen 94. Páginas 871–875.
- [14] Kannaujia S., Chatteraj S.L., Jayalath D., Ray P.K.C., Bajaj K., Podali S., Bisht M.P.S. (2019) Integration of satellite remote sensing and geophysical techniques (electrical resistivity tomography and ground penetrating radar) for landslide characterization at Kunjethi (Kalimath), Garhwal Himalaya, India. *Natural Hazards*. Volumen 97, Páginas 1191–1208. DOI: [10.1007/s11069-019-03695-0](https://doi.org/10.1007/s11069-019-03695-0).
- [15] Falae P.O., Kanungo D.P., Chauhan P.K.S., Dash R.K. (2019) Electrical resistivity tomography (ERT) based subsurface characterisation of Pakhi Landslide, Garhwal Himalayas, India. *Environmental Earth Sciences*. Volumen 78. DOI: [10.1007/s12665-019-8430-x](https://doi.org/10.1007/s12665-019-8430-x).
- [16] Sharma S.P., Anbarasu K., Gupta S., Sengupta A. (2010) Integrated very low-frequency EM, electrical resistivity, and geological studies on the Lanta Khola landslide, North Sikkim, India. *Landslides*. Volumen 7, Páginas 43–53. DOI: [10.1007/s10346-009-0187-y](https://doi.org/10.1007/s10346-009-0187-y).
- [17] Yhokha A., Goswami P.K., Chang C.P., Yen J.Y., Ching K.E., Aruche K.M. (2018) Application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) in monitoring slope movements in Nainital, Uttarakhand Lesser Himalaya, India. *Journal of Earth System Science*. Volumen 127. DOI: [10.1007/s12040-017-0907-y](https://doi.org/10.1007/s12040-017-0907-y).
- [18] Marthia T.R., Reddy P.S., Bhatt C.M., Raj K.B.G., Nalini J., Padmanabha E.A., Narender B., Kumar K.V., Muralikrishnan S., Rao G.S., Diwakar P.G., Dadhwal V.K. (2016) Debris volume estimation and monitoring of Phuktal river landslide-dammed lake in the Zaskar Himalayas, India using Cartosat-2 images. *Landslides*, Volumen 14. Páginas 373–383. DOI: [10.1007/s10346-016-0749-8](https://doi.org/10.1007/s10346-016-0749-8).
- [19] Dikshit A., Satyam N. (2019) Probabilistic rainfall thresholds in Chibo, India: estimation and validation using monitoring system. *Journal of Mountain Science*. Volumen 16. Páginas 870–883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5189-6>

- [20]Dikshit A., Satyam D.N., Towhata I. (2018) Early warning system using tilt sensors in Chibo, Kalimpong, Darjeeling Himalayas, India. Nat. Hazards. Volumen 94. Páginas 727–741.