

# II CONGRESO INTERNACIONAL

en Innovación, Desarrollo y Aplicaciones  
en Ingeniería Civil

CI-IDEA

ISSN: 2711-2853



Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Santo Tomás  
Seccional Villavicencio

**II Congreso Internacional  
en Innovación, Desarrollo  
y Aplicaciones en Ingeniería Civil  
CI-IDEA**



# II Congreso Internacional en Innovación, Desarrollo y Aplicaciones en Ingeniería Civil CI-IDEA

Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Santo Tomás  
Seccional Villavicencio

2021





*II Congreso Internacional en Innovación, Desarrollo y Aplicaciones en Ingeniería Civil*  
Universidad Santo Tomás, Seccional Villavicencio, 2023  
Vicerrectoría Académica  
División de Arquitectura e Ingenierías  
Facultad de Ingeniería Civil

ISSN: 2711-2853

Universidad Santo Tomás, Sede de Villavicencio  
Padre José Antonio Balaguera Cepeda, O. P.  
*Rector*

Fray Rodrigo García Jara, O. P.  
*Vicerrector Administrativo*

Fray Fray Kimmeln Noarli Cardenal Casas, O.P.  
*Vicerrector Administrativo*

### **Edición**

Coordinación editorial: Nicolás Sepúlveda Perdomo  
Corrección de estilo: Tatiana Bedoya Mesa  
Diseño y diagramación: Myriam Enciso Fonseca

Universidad Santo Tomás. Vigilada Minducación.

Reconocimiento personería jurídica: Resolución 3645 del 6 de agosto de 1965, Minjusticia  
Acreditación Institucional de Alta Calidad Multicampus: Resolución 014525 del 28 de julio  
de 2022, 8 años, Mineducación



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir  
Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Esta obra tiene una versión de acceso abierto disponible en el Repositorio Institucional de la  
Universidad Santo Tomás: <https://repository.usta.edu.co/>

## **AUTORIDADES ACADÉMICAS**

Padre José Antonio Balaguera

Cepeda, O. P.

*Rector*

Fray Rodrigo García Jara, O. P.

*Vicerrector Administrativo*

Fray Fray Kimmeln Noarli Cardenal

Casas, O.P.

*Vicerrector Administrativo*

## **DIVISIÓN DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS**

Fray Inael Sánchez Hernández, O.P.

*Decano de la División de Arquitectura*

*e Ingenierías*

Luis Fernando Díaz Cruz

*Decano de la Facultad de Ingeniería Civil*

## **COMITÉ EDITORIAL PARTICULAR SECCIONAL DE VILLAVICENCIO**

Padre José Antonio Balaguera

Cepeda, O.P.

*Rector*

Fray Kimmeln Noarli Cardenal

Casas, O.P.

*Vicerrector Administrativo*

Fray Rodrigo García Jara O.P.

*Vicerrector Académico*

Leonel Cetina Torres

*Dirección CRAI*

Jorge Enrique Ramírez Martínez

*Director Dirección Investigación*

*e Innovación*

Nicolás Sepúlveda Perdomo

*Coordinador editorial*

## **COMITÉ CIENTÍFICO**

Luis Augusto Lara Valencia PhD

Fabián Augusto Lamus Báez PhD

Mario Alberto Marmolejo

Cardona PhD

Carlos Andrés Ordóñez Ante

Álvaro de la Cruz Correa Arroyave

Mónica Yineth Lara Pérez Mg.

Mónica Luceth Álvarez Torres

Iván Darío Acosta Sabogal Mg.

Gonzalo Pulido Silva PhD

Germán Chicangana Montón MsC

Francisco Javier García Orozco PhD

Augusto Antonio Gómez

Capera PhD

Juan Manuel Salgado Díaz Mg.

Jessica María Ramírez Cuello Mg.

Luis Fernando Díaz Cruz Mg.

**(AUTORES)**



# Contenido

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Comité científico                                                                                                                                       | 5  |
| Presentación                                                                                                                                            | 9  |
| Modelación CFD del ensayo de vertedero rectangular<br>del canal hidráulico de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio                            | 13 |
| CFD modeling of the rectangular landfill test of the hydraulic<br>channel of the Universidad Santo Tomás, campus Villavicencio                          | 13 |
| Evaluación experimental del comportamiento mecánico<br>de la <i>guadua angustifolia</i> de La Macarena, Meta                                            | 29 |
| Experimental Evaluation of the Mechanical Behaviour<br>of <i>Guadua Angustifolia</i> from La Macarena, Meta                                             | 29 |
| Inventario de movimientos en masa dentro del Resguardo Indígena Kankuamo<br>al suroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta,<br>Valledupar, Colombia     | 45 |
| Inventory of mass movements within the Kankuamo Indigenous<br>Reservation in the southeast of the Sierra Nevada<br>de Santa Marta, Valledupar, Colombia | 45 |

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de daños superficiales en el pavimento                                              | 55 |
| Simulación híbrida en tiempo real de una tribuna de acero con un amortiguador de fricción semiactivo para la reducción de la respuesta vertical | 67 |
| Real-Time Hybrid Simulation of a Steel Structure Type Tribune with a Semi-Active Friction Damper for Vertical Response Reduction                | 67 |
| Aplicación de la simulación de Montecarlo a la evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en roca                                   | 89 |
| Application of the Montecarlo Simulation to the Probabilistic Assessment of the Stability of Slopes on Rock                                     | 89 |

# Presentación

El II Congreso Internacional en Innovación, Desarrollo y Aplicaciones en Ingeniería Civil CI-IDEA fue organizado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás, seccional Villavicencio. Cuenta con la participación de científicos, académicos e investigadores nacionales e internacionales. Este evento tuvo como propósito profundizar en tres ejes temáticos que concuerdan con las líneas del grupo de investigación Geoamenazas e ingeniería civil de la Facultad:

1. Modelación de problemas complejos y minería de datos en ingeniería civil
2. Caracterización y comportamiento mecánico de los materiales de construcción
3. Análisis y evaluación de riesgo en ingeniería civil

El II Congreso se transmitió desde el campus Aguas Claras de la Universidad Santo Tomás los días 4 y 5 de noviembre de 2021.

# Objetivos

## Objetivo general

Facilitar a la comunidad académica, profesional y de empresarios un escenario para discutir, divulgar y fortalecer la investigación científica y las redes de conocimiento sobre las nuevas tendencias de la ingeniería civil, con el fin de favorecer la actualización e intercambio de experiencias nacionales e internacionales.

## Objetivos específicos

- Difundir los progresos, investigaciones y tendencias de ingeniería civil como disciplina enfocada en la solución de problemas complejos en ingeniería y minería de datos
- Fomentar la investigación en los futuros ingenieros de la región, para la producción de información científica sobre modelos complejos de ingeniería
- Conocer el estado de las investigaciones sobre caracterización de materiales, gestión del riesgo en amenazas naturales y modelos complejos de ingeniería

## Agenda del evento

| Horario       | Jueves, 04 de noviembre de 2021                                                                                                                            | Horario       | Viernes, 05 de noviembre de 2021                                                                                                                                                                                        |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8:00 - 8:15   | Instalación de la sesión                                                                                                                                   | 8:00 - 8:15   | Instalación de la sesión                                                                                                                                                                                                |
| 8:15 - 8:20   | Presentación de apertura<br><br>Decano de la Facultad<br>Ing. Manuel Eduardo Herrera                                                                       | 8:00 - 8:40   | <b>Conferencia magistral VI</b><br>Determinación rápida de magnitud y localización de eventos sísmicos, con una sola estación de tres componentes con <i>Machine Learning</i><br><b>Luis Hernán Ochoa Gutiérrez PhD</b> |
| 8:20 - 8:40   | Palabras de Fray José Antonio Balaguera O. P.<br>Rector de la seccional                                                                                    | 8:40 - 09:00  | Sesión de preguntas                                                                                                                                                                                                     |
| 8:40 - 9:00   | Palabras del presidente del concejo municipal<br><br>Óscar Yesid Rodríguez                                                                                 | 09:00 - 09:40 | <b>Conferencia magistral VII</b><br>Control remoto de taludes, GroundProbe<br><b>Albert Javier Cabrejo</b>                                                                                                              |
| 9:30 - 10:00  | <b>Conferencia magistral I</b><br>Simulación y análisis de materiales de construcción<br><b>Juan Manuel Lizarazo PhD</b>                                   | 09:40 - 10:00 | Sesión de preguntas                                                                                                                                                                                                     |
| 10:00 - 10:40 | <b>Conferencia magistral II</b><br>Problemas de interação do concreto projetado com maciços no suporte de túneis<br><b>Tarcisio Barreto Celestino, PhD</b> | 10:00 - 10:40 | <b>Conferencia magistral VIII</b><br>Interferometría satelital con 3v<br><b>Maia Carolina Rogelis PhD</b>                                                                                                               |
| 11:40 - 12:00 | Sesión de preguntas                                                                                                                                        | 10:40 - 12:00 | Sesión de preguntas                                                                                                                                                                                                     |
| 11:00 - 12:40 | <b>Conferencia magistral III</b><br>Aplicación de los dispositivos SLB de cuarta generación en edificios de gran altura<br><b>LUIS M. BOZZO. MSc., PhD</b> | 11:00 - 12:40 | <b>Conferencia magistral IX</b><br>Investigación ingeniería estructural<br><b>Julián Carrillo León PhD</b>                                                                                                              |
| 11:40 - 12:00 | Sesión de preguntas                                                                                                                                        | 11:40 - 12:00 | Sesión de preguntas                                                                                                                                                                                                     |
| 12:00 - 14:00 | Receso                                                                                                                                                     |               | Receso                                                                                                                                                                                                                  |

| Horario       | Jueves, 04 de noviembre de 2021                                                                                                                                 | Horario       | Viernes, 05 de noviembre de 2021                                                                              |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 14:00 - 14:40 | <b>Conferencia magistral IV</b><br>Futuros asentamientos en la luna<br><b>Daniel Gómez Pizano PhD</b>                                                           | 14:00 - 14:40 | <b>Conferencia magistral X</b><br>Revolución industrial 4.0 en ingeniería civil<br><b>Caue Stocci Somenzi</b> |
| 14:40 - 15:00 | Sesión de preguntas                                                                                                                                             | 14:40 - 15:00 | Sesión de preguntas                                                                                           |
| 15:00 - 15:40 | <b>Conferencia magistral V</b><br>Red Sismológica de la Universidad Nacional de Colombia (RSUNAL): alcance y perspectivas<br><b>Juan Manuel Solano Fino PhD</b> | 15:00 - 15:40 | <b>Conferencia magistral XI</b><br>Manejo del recurso hídrico<br><b>Gonzalo Pulido</b>                        |
| 15:40 - 16:00 | Sesión de preguntas                                                                                                                                             | 15:40 - 16:00 | Sesión de preguntas                                                                                           |
| 16:00 - 16:15 | Trabajo simultáneo I                                                                                                                                            | 16:00 - 16:15 | Trabajo simultáneo I                                                                                          |
| 16:15 - 16:30 | Trabajo simultáneo II                                                                                                                                           | 16:15 - 16:30 | Trabajo simultáneo II                                                                                         |
| 16:30 - 16:45 | Trabajo simultáneo III                                                                                                                                          | 16:30 - 16:45 | Trabajo simultáneo III                                                                                        |
| 16:45 - 17:00 | Trabajo simultáneo IV                                                                                                                                           | 16:45 - 17:00 | Trabajo simultáneo IV                                                                                         |

---

# **Modelación CFD del ensayo de vertedero rectangular del canal hidráulico de la Universidad Santo Tomás, seccional Villavicencio**

**CFD modeling of the rectangular landfill test of the hydraulic channel of the Universidad Santo Tomás, campus Villavicencio**

---

**Andrés Germán Díaz Alarcón**

Ingeniero Civil, Universidad Santo Tomás  
andresdiaz@usantotomas.edu.co

**Iván Darío Acosta Sabogal**

Mg, Ingeniero Civil. Docente, Universidad Santo Tomás  
ivan.acosta@usantotomas.edu.co

**Mónica Yineth Lara Pérez**

Mg, Ingeniero Civil. Docente, Universidad Santo Tomás  
monicalara@usantotomas.edu.co

**Resumen:** se replicó, en un modelo matemático de CFD, el ensayo de vertedero rectangular del canal hidráulico del laboratorio de la Universidad Santo Tomás, seccional Villavicencio. Con el fin de identificar el *software* con el cual se realizarían las modelaciones, se revisaron las ofertas del mercado y, de estos, se seleccionó OpenFOAM por generar mejores prestaciones para los propósitos académicos. Se fijaron las condiciones de frontera y variables a modelar a partir de los ensayos. Se observó que los valores de las alturas de láminas de agua distan mínimamente unos de los otros; esta variación se debe a la calidad del mallado trabajado. En cuanto a la revisión de las presiones y desplazamientos de la masa de agua, se encontraron diferencias relacionadas con el control de los caudales: en el canal del laboratorio los valores fluctúan en los tiempos iniciales hasta converger en el caudal establecido; en las modelaciones, el caudal es fijo desde el tiempo cero.

**Palabras clave:** dinámica de fluidos; hidráulica; mecánica de fluidos; modelo matemático; OpenFOAM.

**Abstract:** The rectangular weir test for the hydraulic channel of the laboratory of the Universidad Santo Tomás, campus Villavicencio, was replicated in a CFD mathematical model. In order to identify the software with which the modeling would be carried out, the market offers were reviewed and, from these, OpenFOAM was selected for providing better performance for academic purposes. The boundary conditions and variables to be modeled were set from the tests. It was observed that the values of the water sheets heights are minimally distant from each other; this variation is due to the quality of the mesh worked. Regarding the review of the pressures and displacements of the water mass, differences were found related to the control of the flows rates: in the laboratory channel, the values fluctuate at the initial times until they converge at the established flow rate; in the modeling, the flow rate is fixed from time zero.

**Keywords:** Fluid dynamics; hydraulics; fluid mechanics; mathematical model; OpenFOAM.

## Introducción

El manejo de los fluidos, como líquidos o gases, se ha convertido en una de las principales actividades en diferentes industrias, lo que ha llevado al desarrollo del conocimiento de sus comportamientos físicos [1]. La mecánica de fluidos, como rama de la física, se ha dedicado durante años al estudio y desarrollo de modelos matemáticos que describan los comportamientos de los fluidos, tanto en reposo como en movimiento [2].

Con el fin de analizar de manera eficiente los valores de los ensayos de vertedero en el canal hidráulico del laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomas, seccional Villavicencio, se propone realizar la modelación matemática de los mismos a través de un *software* de mecánica de fluidos, Computational Fluid Dynamics (CFD). Consiste en utilizar las ciencias de la computación, las técnicas numéricas y las interfaces gráficas para resolver los problemas físicos relacionados con el movimiento de los fluidos [3].

Para este caso particular, se modela el ensayo de vertederos, en los cuales se analiza y contrasta la interacción de la masa de agua con el canal, y el vertedero rectangular en función del tiempo, con sus similares en los resultados de la modelación matemática. Para la

modelación, se hace necesario evaluar diferentes *softwares* CFD en términos de interactividad, confiabilidad, necesidad de recursos y presentación de resultados, con el objeto de seleccionar la opción más propicia para las modelaciones.

Investigar el manejo de los recursos hídricos a través de experimentación virtual, como es el ejemplo del uso de *software* CFD, ayuda significativamente en la reducción de recursos. También disminuye la complejidad en la percepción de algunos fenómenos, favorece el análisis de las variables que afectan los comportamientos a modelar, posibilita la variación rápida de las condiciones de frontera, entre otros beneficios [1].

Así, esta investigación busca analizar las diferentes variables que intervienen en la modelación del ensayo de vertederos de un canal hidráulico, en un *software* CFD, para llegar a un comportamiento lo más cercano a la realidad con la mayor eficiencia de recursos. Se tienen en cuenta, por ejemplo, los *softwares* para la modelación, las variables de la dinámica de fluidos a incluir en el modelo, la necesidad de recursos de computación y el tiempo, así como los resultados y sus representaciones, entre otros.

La modelación CFD tiene un proceso genérico y secuencial para

todos los modelos que se pueden generar [4] (Figura 1). La primera parte se conoce como preproceso: se establecen las condiciones de frontera que tendrá la modelación como la geometría de los sólidos a través de malla, las variables que se pretenden analizar y los límites que tendrá el montaje, como por ejemplo el espacio temporal [5]. El segundo paso es el *solver*: se plantea y se da solución al modelo matemático por medio de los algoritmos e iteraciones hasta llegar a los límites establecidos en la anterior etapa. Por último, se encuentra el postproceso: se presentan los resultados, que inicialmente son matrices, pero se pueden representar por medio de gráficos en función del tiempo de acuerdo con las variables establecidas [6].

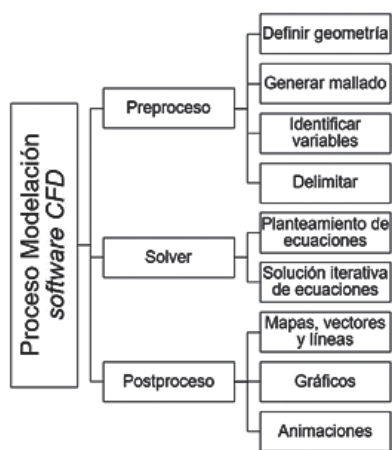


Figura 1. Procesos de modelación *software* CFD.

## Marco teórico

### Ecuaciones de Navier-Stokes

En la dinámica para fluidos incompresibles, existen relaciones directas a las leyes generales que rigen los sistemas dinámicos, incluyendo los determinantes de esfuerzos cortantes para el caso de la viscosidad. A partir de las ecuaciones de Euler, que son deducciones de las leyes de Newton [7], los físicos Claude Navier y George Stokes las modelaron, incluyendo las condiciones viscosas en el transporte másico de fluidos incompresibles:

$$\nabla(\vec{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau_{ij} \tag{2}$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{v}E) = \nabla \cdot (k \nabla T) + p \vec{g} + \nabla \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{v}) + \dot{W}_f + \dot{q}_H \tag{3}$$

Las ecuaciones Navier-Stokes son, en conjunto, el sistema que describe el comportamiento del flujo. De dicho sistema de ecuaciones relacionadas no es posible obtener una solución analíticamente. Por esto, se hace necesario establecer una solución al sistema de ecuaciones a partir de algoritmos[1].

### Algoritmo PIMPLE

Dada la complejidad de los procesos para lograr los resultados de las

ecuaciones para las modelaciones de la dinámica de fluidos, se requiere la utilización de algoritmos que permitan realizar iteraciones para alcanzar la solución analítica más aproximada posible en función de los recursos de cómputo.

El algoritmo PIMPLE es la conjugación de los algoritmos PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) y el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Este algoritmo permite fijar un valor de número de iteraciones de corrección de presión antes de dar solución a las ecuaciones de transporte. En la Figura 2, se esquematiza el algoritmo PIMPLE, incluyendo el número de iteraciones de corrección de presión como 'nCorr'.

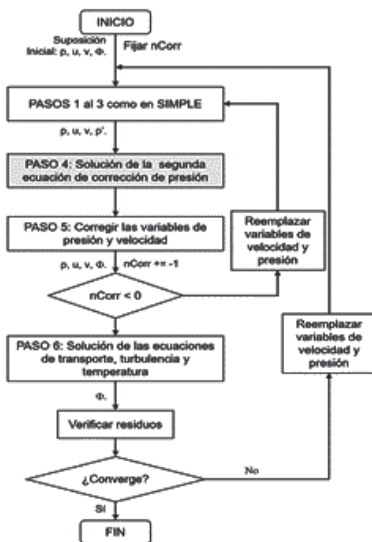


Figura 2. Algoritmo PIMPLE. Tomada y editada de [8].

## Revisión, análisis y selección de *softwares* CFD

Para la selección, se buscó en portales, blogs y foros especializados en CFD como CFD-Online, Autodesk foro para CFD, CFD Direct y el subreddit r/CFD. De esta consulta se pudo obtener una lista de no menos de diez programas y *toolbox* disponibles para la correcta ejecución del presente proyecto. De esta lista se decidió realizar un comparativo con las herramientas que más se ajustaran a las necesidades del proyecto.

El desarrollo de las modelaciones necesarias para este proyecto se realiza con la herramienta OpenFOAM. Para la creación de la geometría y la solución de esta como una malla por el método de volúmenes finitos el *software* Salome de Salome Platform. Esta herramienta nos permite definir qué tan finos serán los volúmenes de control para el montaje. Para cubrir el postproceso se escogió, ParaView que interpreta los resultados del *solver* junto con el mallado para establecer una representación gráfica en función del tiempo de las variables computadas [9] (Figura 3).

**Tabla 1.** Comparativo entre *softwares* Ansys, OpenFOAM y Autodesk CFD.

| Ítem                                      | Ansys  | OpenFOAM  | Autodesk CFD  |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de licencia                          | Pago por suscripción                                                                    | Código abierto                                                                             | Pago por suscripción                                                                           |
| Plataforma                                | Windows / Mac OS                                                                        | Linux / Windows con Ubuntu                                                                 | Windows                                                                                        |
| Interfaz visual                           | Sí                                                                                      | No                                                                                         | Sí                                                                                             |
| Lenguaje de programación                  | No aplica por no ser de código abierto                                                  | C++                                                                                        | No aplica por no ser de código abierto                                                         |
| Permite la optimización de los algoritmos | No                                                                                      | Sí                                                                                         | No                                                                                             |
| Permite editar herramientas               | Sí                                                                                      | Sí                                                                                         | No                                                                                             |
| Apoyo para el aprendizaje                 | Soporte técnico                                                                         | Foros y comunidades de desarrollo especializadas en cada solucionador                      | Soporte técnico y foros                                                                        |



**Figura 3.** Herramientas complementarias para OpenFOAM.

## Montaje de las pruebas de laboratorio

Los montajes se realizaron con los accesorios para ensayo de vertederos que incluye el canal hidráulico FC300, como el *holder* y los vertederos necesarios para el caso. Adicionalmente, se utilizó el tablero de presiones de 32 vías [10]. El *holder* se ubicó a la mitad de distancia que recorre el canal, es decir, a 3,50 m del inicio, como se observa en la Figura 4.

Aunque el canal permite configurar pendiente variable, para este ensayo se decidió trabajar con este en posición totalmente horizontal, es decir, 0.00 % de pendiente.

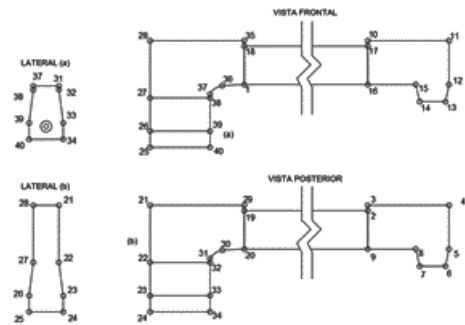
Con el fin de poder medir las láminas de agua y los filos, con ayuda del caudalímetro, se establecieron gradualmente caudales de 15 L/s para el ensayo de vertedero rectangular.



**Figura 4.** Montaje para ensayos de vertedero rectangular.

## Construcción de las mallas

La modelación de la geometría requiere ser exacta, por lo que se procedió con la medición de todas las dimensiones del montaje con la ayuda de cintas métricas y calibradores. Estos datos de medición se usaron para elaborar planos 2D del canal (Figura 5) de los cuales se extrajeron puntos coordenados como se muestra en la Tabla 2.



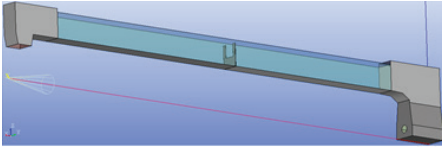
**Figura 5.** Planos referenciados del canal y puntos coordenados.

Tabla 2. Condiciones de borde coordenadas en XYZ.

| Coordenadas |       |       |       |       |       |        |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Punto       | X     | Y     | Z     | Punto | X     | Y      | Z     |
| 1           | 1.100 | 0.000 | 0.737 | 21    | 0.000 | 0.300  | 1.250 |
| 2           | 8.600 | 0.300 | 1.187 | 22    | 0.000 | 0.300  | 0.580 |
| 3           | 8.600 | 0.300 | 1.250 | 23    | 0.000 | 0.350  | 0.190 |
| 4           | 9.550 | 0.300 | 1.250 | 24    | 0.000 | 0.350  | 0.000 |
| 5           | 9.550 | 0.300 | 0.737 | 25    | 0.000 | -0.050 | 0.000 |
| 6           | 9.509 | 0.300 | 0.535 | 26    | 0.000 | -0.050 | 0.190 |
| 7           | 9.209 | 0.300 | 0.535 | 27    | 0.000 | 0.000  | 0.580 |
| 8           | 9.161 | 0.300 | 0.737 | 28    | 0.000 | 0.000  | 1.250 |
| 9           | 8.600 | 0.300 | 0.737 | 29    | 1.100 | 0.300  | 1.250 |
| 10          | 8.600 | 0.000 | 1.250 | 30    | 0.843 | 0.300  | 0.723 |
| 11          | 9.550 | 0.000 | 1.250 | 31    | 0.700 | 0.300  | 0.625 |
| 12          | 9.550 | 0.000 | 0.737 | 32    | 0.700 | 0.300  | 0.580 |
| 13          | 9.509 | 0.000 | 0.535 | 33    | 0.700 | 0.350  | 0.190 |
| 14          | 9.209 | 0.000 | 0.353 | 34    | 0.700 | 0.350  | 0.000 |
| 15          | 9.161 | 0.000 | 0.737 | 35    | 1.100 | 0.000  | 1.250 |
| 16          | 8.600 | 0.000 | 0.737 | 36    | 0.843 | 0.000  | 0.723 |
| 17          | 8.600 | 0.000 | 1.187 | 37    | 0.700 | 0.000  | 0.625 |
| 18          | 1.100 | 0.000 | 1.187 | 38    | 0.700 | 0.000  | 0.580 |
| 19          | 1.100 | 0.300 | 1.187 | 39    | 0.700 | -0.050 | 0.190 |
| 20          | 1.100 | 0.300 | 0.737 | 40    | 0.700 | -0.050 | 0.000 |

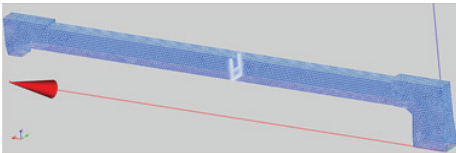
La construcción de las mallas, bajo el método de volúmenes finitos, se realizó con Salome 9.4.0. A partir del listado de puntos coordenados, se realizaron los lazos y, a partir de estos,

las caras que generan la geometría del canal. Sobre esta geometría se montó el vertedero como se aprecia en la Figura 6.



**Figura 6.** Geometría del canal en Salome.

Una vez establecidas las geometrías, basadas en las dimensiones reales del canal, se procedió a la sección de mallado de Salome. Con el fin de establecer los volúmenes de control por el método de elementos finitos, se elaboraron tetraedros cuyas caras deben medir entre 0.05 m y 0.01 m, lo más finas que sean posible (Figura 7). Estos límites se establecieron con el fin de encontrar un equilibrio entre la calidad de la modelación y su tiempo del cálculo.



**Figura 7.** Mallado del canal en Salome.

Como resultado de este proceso se generaron 63 684 tetraedros para el modelo del vertedero rectangular.

## Definición del *solver*, condiciones de frontera y parámetros de la modelación

Para la modelación de los ensayos de vertederos se trabajó con el grupo Multiphase que permite la solución de modelaciones en las que interactúan varios fluidos de características variadas y, en específico, el InterFoam que permite “solucionar dos fluidos compresibles, isotérmicos inmiscibles utilizando volúmenes finitos” [3].

Una vez generada la geometría y el mallado de los modelos del canal con los vertederos, se establecieron las condiciones de borde para el conjunto de caras que las componen. La cara en la que se encuentra la conexión con la tubería de suministro se fija como la entrada o *inlet*, la salida de descarga del canal se establece como *outlet*, las caras libres como la atmosfera o *atmosphere* y, por último, las demás caras como las paredes o *modelwall*.

De la misma forma, OpenFOAM requiere que se identifiquen cuáles de las condiciones de borde son muros (*wall*) y cuáles son parches (*patch*) a los cuales se les definirá las condiciones de frontera. Para el caso particular, se establecen las condiciones de borde como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Condiciones de borde.

| Borde      | Condición    |
|------------|--------------|
| modelwall  | <i>wall</i>  |
| inlet      | <i>patch</i> |
| outlet     | <i>patch</i> |
| atmosphere | <i>patch</i> |

Como condiciones iniciales, dentro del directorio de tiempo definido como 0, se estableció en control de velocidad  $U$ , un valor de flujo volumétrico de entrada de  $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$  para el ensayo de vertedero rectangular de acuerdo con lo establecido en las pruebas de laboratorio. Correspondiente a lo anterior, dentro de *alpha.water* se estableció como la única entrada de agua el borde *inlet*.

Como se trabaja con el solucionador InterFoam, fue necesario establecer las propiedades de los dos fluidos que interactuarán en la modelación, es decir, el agua y el aire. Para estos se fijaron los valores de viscosidad cinemática y la densidad para los dos fluidos a una temperatura promedio aproximada de  $18^\circ\text{C}$  (control en laboratorio), como se muestra en la Tabla 4. Estos valores se deben establecer en el fichero *transportProperties*.

**Tabla 4.** Valores de viscosidad cinemática y densidad. Tomado y modificado de [7].

| Fluido a $18^\circ\text{C}$ | Viscosidad Cinemática $\nu$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) | Densidad $\rho$ ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| agua                        | $1.49 \text{ e-}06$                                   | 998.68                                    |
| aire                        | $1.48 \text{ e-}05$                                   | 1.21                                      |

Por último, otras propiedades generales para la modelación fueron:

- Valor de la gravedad  $-9.81 \text{ m}/\text{s}^2$  en el sentido del eje coordenado  $y$ .
- La modelación inicia en el tiempo 0, en el que se establecieron las condiciones iniciales y termina en el tiempo 120. Cada unidad de tiempo en OpenFOAM corresponde a un segundo.
- Se escriben ficheros de resultados cada variación temporal de la modelación de 0.05 segundos. Se obtuvieron en total 2400 ficheros para una tasa de 20 fps.
- No se establecen condiciones ni variables para el análisis de vorticidades por el tamaño del modelo y las restricciones de recursos.
- El *solver* InterFoam establece el algoritmo PIMPLE para solución de las ecuaciones de conservación y transporte.

Se establece que al inicio de la modelación no se encuentran masas de agua en el canal.

El borde *outlet* se configura para permitir la salida del fluido agua a la misma tasa en entrada al canal, como máximo.

## Simulación y tiempos de simulación

Una vez inicializada la simulación con InterFoam, el tiempo de cálculo dependió directamente de tres factores: el tipo de flujo a evaluar, el tamaño del mallado y, en mayor medida, de la capacidad de procesamiento del equipo a utilizar. Las características del tipo de flujo y tamaño de las mallas ya se han establecido en las secciones anteriores. La Tabla 5 muestra las características del equipo utilizado para correr la modelación.

**Tabla 5.** Características del equipo de cómputo.

| Ítem                        | Característica               |
|-----------------------------|------------------------------|
| tipo                        | computador personal portátil |
| arquitectura del procesador | 64 bits                      |
| sistema operativo           | Windows 10 Home v.1909       |
| procesador                  | Intel® Core™ i5-4200M        |

| Ítem                       | Característica |
|----------------------------|----------------|
| velocidad de procesamiento | 2.50 GHz       |
| núcleos del procesador     | 2 núcleos      |
| memoria RAM instalada      | 8 GB           |

Aunque la modelación en sí no es compleja, el tamaño del canal y el tamaño de los mallados hace que los requerimientos de capacidad de procesamiento sean altos. La Tabla 6 muestra los tiempos de ejecución de las modelaciones bajo las condiciones establecidas y los recursos de procesamiento para el ensayo.

**Tabla 6.** Tiempos de cómputo de las modelaciones.

| Ensayo                |            |
|-----------------------|------------|
| Vertedero Rectangular |            |
| Tiempo Modelado (s)   | 120        |
| ExecutionTime         | (s) 223514 |
|                       | (h) 62.09  |
| ClockTime             | (s) 274813 |
|                       | (h) 76.34  |

Igualmente, se resalta que la consola devuelve los valores de *ExecutionTime* y *ClockTime* que corresponden a los tiempos que toma la CPU en realizar el proceso y el tiempo real transcurrido para completar el cálculo. Aunque en este particular la diferencia no es mayor, en el caso de utilizar procesamiento en paralelo

en diferentes núcleos, estos valores serán sustancialmente diferentes. Por ejemplo, para un procesador de 4 núcleos que calculan en paralelo, el tiempo *ClockTime* será muy cercano a la cuarta parte del *ExecutionTime* [11].

## Análisis de resultados

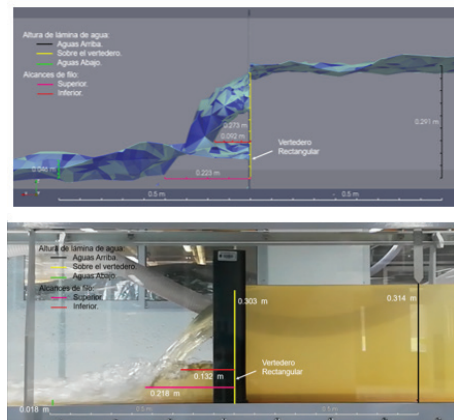
### Alturas de láminas de agua y alcance de los fillos de lámina vertiente

Con el fin de realizar una toma de valores de la manera más uniforme y clara posible, se establecieron las mediciones como:

- 0.50 m aguas arriba a partir de la cara del vertedero.
- Sobre el vertedero.
- 0.50 m aguas abajo a partir de la cara del vertedero.
- Desde la cara del vertedero hasta el primer filo de la lámina vertiente.
- Desde la cara del vertedero hasta el último filo de la lámina vertiente.

En el caso de los ensayos de laboratorio, las mediciones se realizaron después de los dos minutos de haber encendido la bomba, pues es el flujo más estable en

todo el canal. Por otra parte, para las simulaciones, se tomó como referencia 96 s, pues corresponde a los tiempos en los que se vuelve más continuo el flujo, luego de verter. La Figura 8 muestra los resultados tomados de los ensayos de laboratorio y las modelaciones realizadas.



**Figura 8.** Mediciones realizadas en el ensayo y modelación de vertedero rectangular.

Comparando las mediciones obtenidas de los ensayos de laboratorio y los de la modelación podemos resaltar que las diferencias no superan los 5 cm como lo muestra la Tabla 7. Estas variaciones pueden estar relacionadas directamente con la calidad del mallado, pues cabe recordar que los valores de las alturas de las caras de los volúmenes de control varían entre 1 y 5 cm.

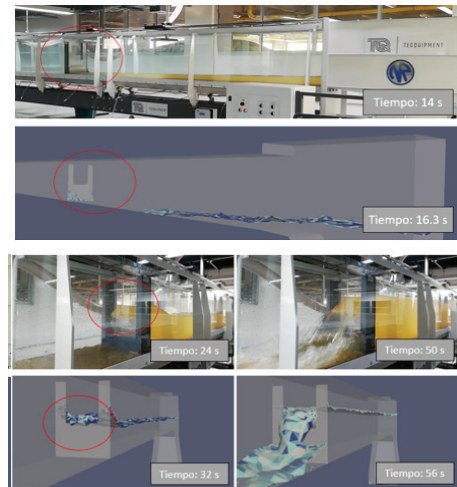
**Tabla 7.** Relación de valores del ensayo y modelación para el vertedero rectangular.

| Parámetro                   | Ítem                | Medición (m) |        | Variación (cm) | Ecuación (m) |
|-----------------------------|---------------------|--------------|--------|----------------|--------------|
|                             |                     | Ensayo       | Modelo |                |              |
| Altura lámina de agua       | 0.50 m aguas arriba | 0.314        | 0.291  | 2.30           | 0.336        |
|                             | Sobre vertedero     | 0.303        | 0.273  | 3.00           |              |
|                             | 0.50 m aguas abajo  | 0.018        | 0.046  | 2.80           | 0.032        |
| Filo de la lámina vertiente | Superior            | 0.218        | 0.223  | 0.50           | 0.316        |
|                             | Inferior            | 0.132        | 0.092  | 4.00           | 0.184        |

En relación con los valores calculados a través de las ecuaciones para los vertederos, las diferencias son mayores respecto a los valores de los ensayos y las modelaciones. Para la solución de las ecuaciones se estableció un coeficiente de descarga de 0.242, de acuerdo con [4]. Las variaciones en el coeficiente de descarga generan diferencias en la altura de lámina de agua, aguas arriba del vertedero, que están implícitas en el cálculo de los filos de lámina de vertimiento.

## Desplazamiento de la masa de agua en función del tiempo

Con el fin de realizar el comparativo se establecieron diferentes ítems de los cuales se anotaron los tiempos en los que se cumplen estos, tanto en la modelación como en el ensayo.



**Figura 9.** Comparaciones temporales de los ítems para el vertedero rectangular.

Es importante anotar que, como se mencionó en la sección anterior, el caudal en los ensayos no se puede controlar como un valor único, lo que en principio propicia cambios importantes en el flujo. Por ejemplo,

como se aprecia en la Tabla 8 en y la Figura 9, los valores temporales para el ítem de inicio del vertimiento están ampliamente desfasados, comparando las pruebas físicas con las virtuales.

**Tabla 8.** Desplazamiento temporal de la masa de agua para el ensayo y laboratorio de vertedero rectangular.

| Ítem                     | T. en vertedero rectangular (s) |        | Variación con respecto al anterior (s) |        |
|--------------------------|---------------------------------|--------|----------------------------------------|--------|
|                          | Lab.                            | Model. | Lab.                                   | Model. |
| Primer flujo en el canal | 11                              | 13.5   | -                                      | -      |
| Flujo toca el vertedero  | 14                              | 16.3   | 3                                      | 2.75   |
| Comienza a verter        | 24                              | 32.0   | 10                                     | 15.75  |
| Flujo estable            | 50                              | 56.0   | 26                                     | 24     |

En el caso del vertedero rectangular, existen variaciones temporales entre la modelación y el ensayo, pero no son tan importantes, teniendo en cuenta las variaciones en el caudal del ensayo (Figura 9). Dichas variaciones se pueden ver reducidas en cuanto avanza el tiempo y el caudal se torna más estable, en el ensayo de laboratorio, en torno a los 15 L/s. En la Tabla 8, la variación con respecto al anterior nos permite entender los cambios entre intervalos de tiempo.

## Conclusiones

Aunque OpenFOAM no es la herramienta CFD más utilizada en la industria de la ingeniería, sin estar en un lugar despreciable, sí es el *software* más usado en el campo académico. La posibilidad de revisar en el código cada ecuación, algoritmo y parámetro permite la mejor comprensión de los fenómenos a analizar desde el punto de la física y, no menos importante, tener la capacidad de realizar modificaciones a los *solver* existentes o crear alguno propio a partir de los existentes.

Los tiempos de cálculo para los ensayos CFD tienen relación directa con la capacidad de cómputo que esté al alcance del usuario. Como se identifica en la Tabla 6, para el caso de las modelaciones que atañen el desarrollo de este proyecto, tomaron días para llevarse a cabo. Para realizar modelaciones de mayor escala o a mayor detalle es necesario contar con más recursos en cuanto a *software*.

Desde el punto de la comparación de las alturas de láminas de agua y filos de las láminas vertientes, se puede establecer que se logró una gran fidelidad entre las modelaciones y los ensayos. Si bien se pueden encontrar variaciones, menores a los 5 cm en algunos casos, estas tienden a reducirse

aumentando la calidad del mallado. La condición del canal para ensayos hidráulicos, en cuanto al control del caudal se refiere, generan discrepancias importantes en el análisis de cambios volumétricos de la masa de agua. Los tiempos en que se presentan los fenómenos analizados son circunstancialmente diferentes debido a que, en caso contrario a los ensayos, dentro de la simulación sí se pudo establecer un caudal constante.

## Bibliografía

- [1] F. Moukalled, L. Mangani y M. Darwish, *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*, New York: Springer International Publishing, 2016.
- [2] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*, 3th ed., New York: McGraw Hill, 2012.
- [3] A. Rodríguez-Díaz, *Hidráulica experimental*, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.
- [4] J. C. Arango-Escobar, *Analysis of Hydrodynamic Forces on High-Head Slide Gates Using Computational Fluid Dynamics*, tesis MA, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2018.
- [5] J. M. Fernández-Oro, *Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*, Barcelona: Editorial Reverté, S.A., 2012.
- [6] R. J. LeVeque, *Finite Volumen Methods for Hyperbolic Equations*, Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [7] *User Guide*, The OpenFOAM Foundation, 2020.
- [8] R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos*, México: Pearson, 2006.
- [9] T. Kajishima y K. Taira, *Computational Fluid Dynamics: Incompressible Turbulent Flows*, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [10] *User Guide*, TecQuioment Ltd., Flow Channel FC300, London, 2018.
- [11] A. Villamizar-Hernández, *Aplicación de un modelo turbulento*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2014.



---

# **Evaluación experimental del comportamiento mecánico de la *guadua angustifolia* de La Macarena, Meta**

## **Experimental Evaluation of the Mechanical Behaviour of *Guadua Angustifolia* from La Macarena, Meta**

---

**Jorge Yesid Torres Espitia**

Ingeniero civil, Universidad Santo Tomás  
jorgetorrese@usantotomas.edu.co

**Daniel Felipe Herrera Ramos**

Ingeniero civil, Universidad Santo Tomás  
Daniel.herrerar@usantotomas.edu.co

**Bregy Hassler Choque Jiménez**

Ingeniero civil, Universidad Santo Tomás  
bregychoque@usantotomas.edu.co

**Resumen:** las estructuras construidas en material vegetal, como la guadua, se caracterizan por el empleo de materiales de la región, maquinaria manual de bajo costo, poca mano de obra y sobre todo una obra con menor contaminación ambiental. Es una opción económica y ecológica que funciona como alternativa a la problemática ambiental, ya que la guadua puede acoplarse a las sensaciones naturales y ambientales de la zona donde se vaya a instalar. La guadua utilizada fue cultivada en el departamento del Meta en la región del Ariari. En esta investigación se realizó una evaluación experimental del comportamiento de la guadua ante esfuerzos de compresión paralelos y perpendiculares a la fibra. Se evaluó también su resistencia a la tracción paralela a las fibras. Para la guadua investigada se evidenció una resistencia a la compresión paralela en la fibra menor al 18 % del promedio de los estudios disponibles.

**Palabras clave:** *guadua angustifolia*; diseño estructural; medioambiente.

**Abstract:** Structures built with plant material, such as guadua, are characterized by using local materials, low-cost manual machinery, low labour costs and, above all, less environmental contamination. It is an economic and ecological option that works as an alternative to environmental problems since guadua can be adapted to the natural and ecological sensations of the area where it will be installed. The guadua used was cultivated in the department of Meta in the Ariari region. In this research, an experimental evaluation of guadua's behaviour under compression stresses parallel and perpendicular to the fiber was carried out. Its tensile strength parallel to the fibers was also evaluated. For the investigated guadua, a resistance to parallel compression in the fiber was less than 18 % of the average of the available studies.

**Keywords:** *Guadua angustifolia*; structural design; environment.

## Introducción

Las estructuras en material vegetal han crecido gradualmente en Colombia. El uso de un recurso renovable y económico para la solución de un problema es una alternativa que presenta ventajas significativas. Desde hace varios años los indígenas han usado el bambú y la guadua angustifolia para construir puentes pequeños. Según Carmiol, los indígenas paeces son pioneros en la construcción de puentes peatonales en guadua, algunos puentes atirantados con el mismo material y anclados a árboles usados como pilotes. Los indígenas también utilizaron la guadua para construir chozas, casas y otras estructuras [1].

El uso de la guadua como material estructural es importante para las nuevas investigaciones que buscan una alternativa ecológica y con un menor costo. La capacidad de resistencia a la compresión, tracción, flexión y corte que ofrece el material puede generar estructuras con capacidades sismorresistentes. Por eso se ha elegido este material para construcciones más grandes e innovadoras que contribuyen a generar un mayor patrimonio cultural colombiano [2][3].

## Caracterización de la *guadua angustifolia* del Departamento del Meta

### Preliminares

Antes de los ensayos, se solicitó el material y se transportó desde su punto de venta en Granada, Meta. Esta guadua corresponde al grupo de cultivo de La Macarena, Meta. Perteneció a la especie de cebollas inmunizadas con vinagre y con el respectivo curado de inmersión en el agua. Los ensayos pertinentes para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la *guadua angustifolia* se realizaron según la normativa colombiana NTC 5525 [4] que da los parámetros para el corte de la mata, sus longitudes, marcas y número de ensayos. La guadua fue almacenada como muestra la Figura 1.

### Recepción y almacenamiento

El despacho se dio desde el municipio de Granada, Meta, donde fueron marcadas y cortadas las probetas propias para los ensayos de compresión paralela, compresión perpendicular, tracción y corte paralelos. Para esto fue necesario escoger diferentes culmos de guadua, facilitados por el personal. Estos culmos fueron examinados para que no tuvieran agrietamientos,

fisuras, ni deformaciones en toda la longitud del culmo. Por último, fueron cortados con una sierra de disco en diferentes secciones aprovechando cada parte del culmo.



Figura 1. Almacenamiento de *guadua angustifolia*.

### Identificación y corte de las probetas

Se hace una identificación de la composición de la guadua para realizar los ensayos, como lo muestra la Figura 2, y se utilizan varias partes del culmo para identificar las propiedades de las diferentes partes de la guadua. Según la norma NSR-10, para determinar el valor característico de la guadua es necesario tener un número de probetas mayor o igual a 20 y así poder determinar el percentil 5. Por eso, es necesario distribuir cada probeta sobre la longitud del culmo antes de ser cortada, identificando las partes en las que hay nudo o canuto de la guadua.

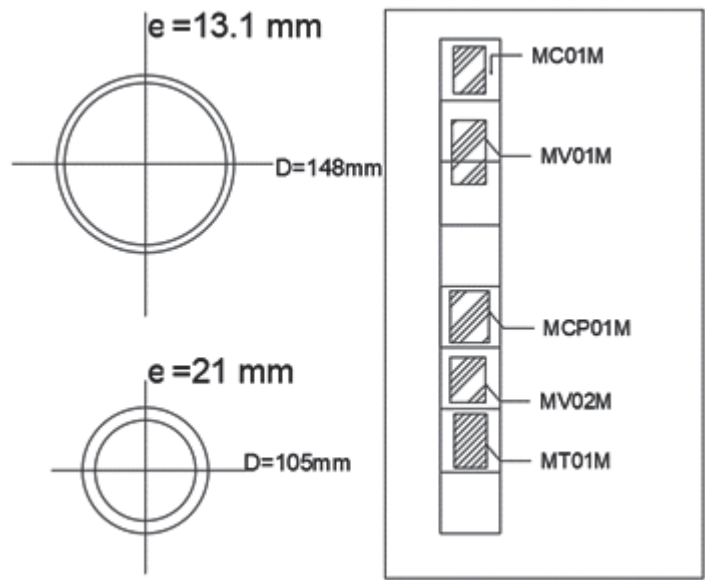


Figura 2. Composición de la guadua.

La Tabla 1 muestra los procedimientos que la norma técnica colombiana proporciona para la identificación del culmo, el corte y la proporción de la probeta para el respectivo ensayo.

**Tabla 1.** Cantidad de probetas por guadua de los diferentes puntos de la guadua.

| M<br>(Media superior) | CP<br>(Culmo principal) | 1 (nudo) | M<br>(Media inferior) |
|-----------------------|-------------------------|----------|-----------------------|
| (1)                   | (2)                     | (3)      | (4)                   |

- Departamento de origen (Departamento del Meta)
- Solicitación de ensayo
- Compresión paralela (C)
- Compresión perpendicular (CP)
- Tracción paralela (T)
- Corte paralelo (V)
- Flexión longitudinal (F)
- Número de ensayo
- Parte del culmo (media)

## Metodología para determinar los esfuerzos admisibles

Después del corte y el marcado de cada probeta de guadua, fue necesario realizar un estado del arte: las normas ayudan a determinar los valores característicos y, así, se pueden determinar los esfuerzos admisibles presentados en la guadua a estudiar. El procedimiento para los ensayos de compresión y tracción paralelas se

tomaron de la norma NTC 5525 [4], y la determinación de los esfuerzos admisibles de la norma NSR-10 [5] y la ISO 22156:2004 [6]. Los ensayos de compresión perpendicular se tomaron de acuerdo con el proyecto MADRC [7].

En la Figura 3 y en la 4 se muestran los ensayos de compresión paralela y perpendicular que fueron realizados en la máquina para ensayos mecánicos a compresión de la marca ELE International, con capacidad para 10 toneladas de fuerza suministrada. La máquina está ubicada en la seccional Bogotá de la Universidad Santo Tomás. Cabe resaltar que la máquina debió transportarse para realizar el ensayo de la solicitud esperada.



**Figura 3.** Equipo para ensayos de compresión.



**Figura 4.** Equipo para ensayo de tracción.

El ensayo a tracción fue realizado en la maquina universal para ensayos mecánicos ubicada en la Universidad Santo Tomás, seccional Bogotá, con capacidad para ensayar diferentes materiales. Las probetas fueron ubicadas respectivamente y sus mordazas fueron adecuadas para poder realizar el ensayo a tracción. Una vez obtenidos los resultados de los ensayos a diferentes solicitaciones, se hizo el correspondiente análisis estadístico. Se determinó la varianza, la desviación estándar y el percentil 5 de los datos, para poder hacer la comparación con otros estudios y así determinar las características de resistencia. Las comparaciones se hicieron con

las normas ISO 22156:2004 [6] y la NSR-10 [5].

### **Determinación de los esfuerzos admisibles**

Con el correspondiente valor de la fuerza obtenida para fallar cada probeta solicitada por el ensayo y con los valores de la geometría del material como diámetro, longitud, espesor de la pared de la probeta de ensayo y número de probeta, se recolectaron y analizaron los datos.

Una vez determinado el esfuerzo, se hizo el análisis estadístico y se determinó el valor característico de la sollicitación correspondiente ( $R_{ki}$ ). Este valor corresponde a la ecuación de la norma ISO 22156:2004 [6], numeral 7.2.1, que también es utilizada en la NSR-10, en su título G capítulo G.12 [5].

### **Ensayo de compresión paralela a la fibra**

Para determinar la resistencia y el esfuerzo últimos a compresión paralela a la fibra de la guadua, se hicieron 20 probetas de las cuales todas pertenecen a la parte media del culmo. La preparación del ensayo se hizo siguiendo los parámetros de la norma Icontec NTC 5525 [4] (Figura 5).



**Figura 5.** Ensayo de compresión paralela a las fibras.



**Figura 6.** Probeta fallada en el ensayo de compresión paralela.



**Figura 7.** Probeta fallada en el ensayo de compresión paralela.

Para el ensayo es necesario verificar la disposición de la máquina y, en caso de una adecuación del equipo, se hará siempre y cuando no se afecten los datos obtenidos o se haga variar la resistencia del material.

Los datos de esfuerzo último son dados con las condiciones geométricas de la probeta como el diámetro externo, el área de la probeta y la resistencia dada en KN. Lo anterior se expresa en la ecuación 7.1 de NTC 5525 [4].

$$\sigma_{uc} = \frac{F_{ult}}{A}$$

- $\sigma_{uc}$  = Esfuerzo último a compresión paralela a la fibra
- $F_{ult}$  = Resistencia última a la falla de la probeta de guadua
- $A$  = Área de la sección transversal de la probeta, calculada como:

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2t)^2)$$

La *guadua angustifolia* es un material del cual no se espera una falla súbita en sus elementos estructurales, solo en aspectos locales. Se puede evidenciar en las Figuras 6 y 7 que la falla se produce solo longitudinalmente sobre la probeta, pues las estructuras en guadua tienen un periodo de vida extenso.

Para determinar los esfuerzos admisibles, es necesario realizar un análisis estadístico de los datos

obtenidos en el laboratorio. La Tabla 2 refleja los resultados obtenidos de los cálculos realizados.

Los datos del esfuerzo último varían con respecto al diámetro según la mecánica de los materiales: cuanto más área de contacto tenga la fuerza aplicada, menor será el esfuerzo. Los datos fueron revisados teniendo en cuenta sus unidades. A continuación, se presenta el análisis estadístico que se realizó con los datos obtenidos del ensayo.

Tabla 2. Análisis estadístico de la compresión paralela.

| Compresión paralela a la fibra |        |       |
|--------------------------------|--------|-------|
| Datos                          | Medio  | Total |
| Nº de datos                    | 20     | 20.00 |
| Promedio (MPa)                 | 28.191 | 28.19 |
| Desvest (MPa)                  | 5.406  | 5.41  |
| Coef. variación %              | 19.175 | 19.18 |
| Percentil 5 (MPa)              | 17.391 | 17.39 |
| Varianza                       | 29.220 | 29.22 |

El valor característico  $R_{ki}$  se obtuvo con la ecuación descrita anteriormente. Las variables son correspondientes a los datos del análisis estadístico. El promedio (MPa) es el esfuerzo del ensayo de compresión paralela  $\sigma_{uc}$  (MPa). Este valor se calculó teniendo

en cuenta la fuerza ejercida sobre cada probeta llevada al fallo sobre las propiedades geométricas de cada probeta. El valor del percentil 5 varía de acuerdo con el número de datos tenidos en cuenta y la varianza de valores en los datos: a mayor número de datos mayor el valor característico para el esfuerzo admisible. Estos análisis son obtenidos de la memoria de cálculo en la que se encuentran todos los datos disponibles para realizar los cálculos del promedio, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación y percentil 5.

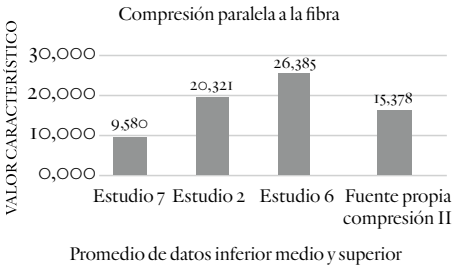


Figura 8. Valor característico de la compresión paralela a la fibra.

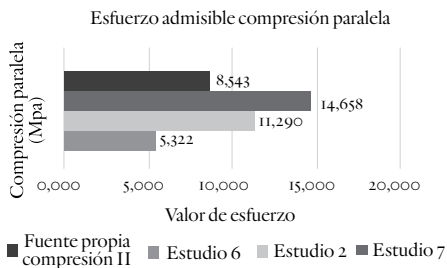
El valor característico para este ensayo arroja un resultado correspondiente a 15.378.

El esfuerzo admisible es determinado con la ecuación  $G_{12-7-2}$ , de la norma NSR-10. La Tabla 3 expresa el resultado obtenido de 8.543 (MPa).

**Tabla 3.** Esfuerzo admisible NSR-10, título G.

|                             | Valor característico medio | Esfuerzo admisible NSR-10 medio |
|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Fuente propia compresión II | 15.278                     | 8.543                           |

Teniendo en cuenta que este valor es directamente proporcional al valor característico, la norma NSR-10 insiste en que el valor de esfuerzo admisible que debe soportar una probeta de ensayo de guadua a compresión paralela es 14 MPa. Este ensayo, realizado con probetas del departamento del Meta, cumple con las condiciones impuestas por la NSR-10 [5].



**Figura 9.** Resultados de los esfuerzos admisibles de la compresión paralela a la fibra.

La comparación con otros estudios determina que el material oriundo del departamento del Meta puede ser de gran utilidad por su cumplimiento en los valores de los esfuerzos admisibles.

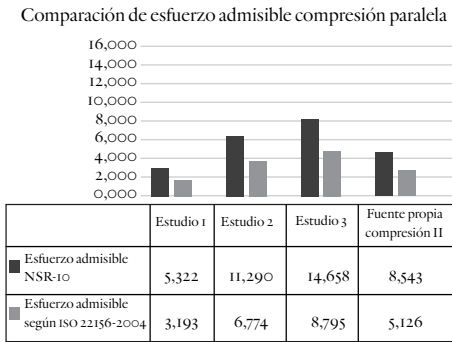
La aplicación de este material al puente peatonal proyectado sobre la carrera 42 garantiza la duración del proyecto.

La norma ISO 22156:2004 [6] determina los esfuerzos admisibles según las diferentes cargas que afectan a la estructura, como la carga muerta, carga viva y las cargas ejercidas por el viento (véase Tabla 4). Los parámetros de esta norma internacional son constantes y varían con respecto a la de la norma colombiana. La comparación permite establecer la diferencia que existe entre las diferentes normas: aunque la ISO 22156:2004 establece unos parámetros más naturales, la NSR-10 [5] varía con respecto a la sollicitación de esfuerzo requerida.

**Tabla 4.** Esfuerzo admisible norma ISO 22156:2004.

| Ensayo                              |        |
|-------------------------------------|--------|
| Compresión paralela a la fibra      |        |
| Valor característico                | 15.378 |
| Carga muerta (m)                    | 3.417  |
| Carga muerta + viva (m+v)           | 4.272  |
| Carga muerta+ viva + viento (m+v+w) | 5.126  |

Los valores del esfuerzo admisible de la ISO 22156:2004 son tenidos en cuenta con la suma de cargas (M+V+W).



**Figura 10.** Comparación de los valores de esfuerzos admisibles entre NSR-10 e ISO 22156:2004.

El esfuerzo admisible según la norma internacional es menor, debido a los parámetros usados para su determinación: la norma internacional divide los coeficientes sobre un factor de seguridad de 2.25, lo que ocasiona una reducción en el esfuerzo.

### Ensayo de compresión perpendicular a la fibra

La resistencia de la probeta sometida a compresión perpendicular dada en KN es el parámetro más importante y, junto a las composiciones geométricas de la probeta, se determinó el esfuerzo último a esta solicitud según la ecuación de la investigación MADRC-UNAL[7].

$$\sigma_{ucp} = \frac{3XDeXF}{2XLxt^2}$$

En donde:

De= diámetro externo de la probeta de guadua  
F= resistencia obtenida por el ensayo  
L= longitud promedio de la probeta de guadua  
t= espesor de la pared de la probeta de guadua

En la Figura 11 y la Figura 12 se muestran los ensayos realizados sobre las probetas de guadua a compresión perpendicular, para determinar la resistencia y el esfuerzo último a compresión perpendicular a la fibra, se hicieron un total de 20 probetas que pertenecen a la parte media del culmo. La geometría de las probetas cambia debido al cambio de diámetro con respecto a la longitud total del culmo de guadua. Así, se estableció una longitud promedio de 15 cm. La preparación del ensayo se dio siguiendo los parámetros propuestos por la norma Icontec NTC 5525 [4] y el proyecto MADRC [8].



**Figura 11.** Probeta fallada en ensayo de compresión perpendicular.



**Figura 12.** Aplastamiento en el ensayo por compresión perpendicular.

Los datos del esfuerzo admisible varían con respecto a las propiedades geométricas de la probeta. La fuerza es aplicada perpendicularmente sobre la fibra, en sentido longitudinal a la probeta, lo que ocasiona un efecto de aplastamiento. La resistencia es baja en comparación con la compresión paralela, según [9]. El autor menciona que la determinación de esta propiedad mecánica es muy importante para el dimensionamiento de elementos que tienen cargas concentradas para así poder evitar los efectos del aplastamiento por fuerzas perpendiculares.

La falla típica en la compresión perpendicular se ve reflejada en fisuras a través de todo el eje longitudinal de la guadua. Este fallo total por aplastamiento solo es admisible en ensayos de laboratorio, pues los

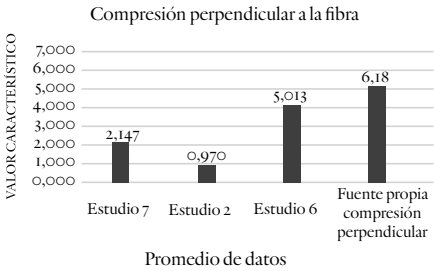
elementos de una estructura en guadua no fallan súbitamente debido a que un elemento estructural es comprendido por varios culmos de guadua [3], [10].

Para determinar los esfuerzos admisibles fue necesario realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos en laboratorio. La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos de los cálculos realizados.

**Tabla 5.** Análisis estadístico de la compresión perpendicular.

| Compresión perpendicular a la fibra |          |         |
|-------------------------------------|----------|---------|
| Datos                               | Medio    | Total   |
| Nº de datos                         | 20       | 20.00   |
| Promedio (MPa)                      | 53.894   | 53.89   |
| Desvest (MPa)                       | 36.448   | 36.45   |
| Coef var %                          | 67.628   | 67.63   |
| Percentil 5 (MPa)                   | 10.442   | 10.44   |
| Varianza                            | 1328.427 | 1328.43 |

El promedio (MPa) es el esfuerzo del ensayo de compresión perpendicular ( $\sigma_{ucp}$ ). Se calculó teniendo en cuenta la fuerza ejercida sobre cada probeta llevada al fallo por aplastamiento y las propiedades geométricas de cada probeta. El valor del percentil 5 varía de acuerdo con el número de datos tenidos en cuenta y la varianza de valores en los datos: a mayor número de datos, mayor el valor característico para el esfuerzo admisible.



**Figura 13.** Valor característico de la compresión perpendicular a las fibras.

La determinación del valor característico se hizo respecto a la norma NSR-10 (Tabla 6) con la ecuación ya mencionada. La determinación del ( $R_{ki}$ ) es directamente proporcional al número de datos tomados y al percentil, cuyo valor depende de los datos que hagan parte del ensayo. El ensayo realizado arrojó un resultado más alto con respecto a los demás ensayos debido a la resistencia obtenida por las probetas.

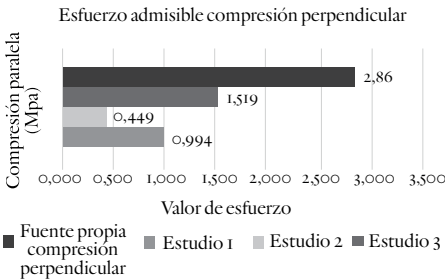
**Tabla 6.** Esfuerzo admisible NSR-10.

| Ensayo                   | Valor Í    | Esfuerzo admisible NSR-10 |
|--------------------------|------------|---------------------------|
| Compresión perpendicular | Medio 6.18 | Medio 2.860               |

El esfuerzo admisible se determina con respecto a la ecuación G.12.7-2 de la norma NSR-10. Se hizo un análisis de acuerdo con los factores de sollicitación para la determinación del esfuerzo admisible, mencionados en la Tabla 6. Los resultados obtenidos muestran

un valor de 2.86 MPa, teniendo en cuenta que este valor es directamente proporcional al valor característico.

La norma NSR-10 menciona que el valor de esfuerzo admisible que debe soportar una probeta de ensayo de guadua a compresión perpendicular es de 1.4 MPa. Este ensayo muestra que la guadua, aunque no cumple con las condiciones impuestas por la NSR-10, se comporta de forma adecuada ante la sollicitación de carga. La resistencia (KN), en comparación con otros estudios y materiales, es bastante alta.

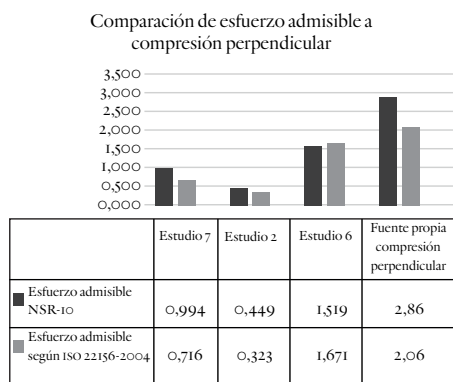


**Figura 14.** Resultados de los esfuerzos admisibles de la compresión perpendicular a la fibra.

Comparar el fallo por aplastamiento debido a la compresión perpendicular entre la norma internacional y nacional da resultados aproximados. Las condiciones para determinar los resultados son totalmente diferentes: la norma colombiana establece unos factores de reducción constantes, mientras que la norma internacional establece un factor de seguridad de 2.25.

**Tabla 7.** Esfuerzo admisible según norma ISO 22156:2004.[6]

| Ensayo                              |       |
|-------------------------------------|-------|
| Compresión paralela a la fibra      |       |
| Valor característico                | 6.18  |
| Carga muerta (m)                    | 1.373 |
| Carga muerta + viva (m+v)           | 1.716 |
| Carga muerta+ viva + viento (m+v+w) | 2.060 |



**Figura 15.** Comparación de esfuerzos admisibles NSR-10 y norma ISO 22156:2004.

## Ensayo de tracción paralela a la fibra

Este ensayo se realizó con 15 probetas extraídas del área longitudinal de diferentes culmos de guadua y siguiendo los parámetros de la normativa NTC-5525 [4]. Para este ensayo se utilizaron probetas sin nudo en la mitad. Cada probeta tenía una longitud de 27 cm, cuyos extremos tenían un agarre para las mordazas de 7.5 cm, y una sección transversal de 2.5

cm por un ancho igual al espesor de la pared del culmo de guadua.

Para la determinación del esfuerzo último a tracción paralela se utilizó la ecuación 10.1 de la normativa NTC-5525:

$$\sigma_{ut} = \frac{F_{ult}}{A}$$

$F_{ult}$  = fuerza a la cual falló la probeta  
 $A$  = área de la sección transversal de la probeta

Los valores obtenidos fueron entre 1.0 a 2.0 toneladas de resistencia. El diagrama de carga versus deformación demuestra la elasticidad que presenta el material en el momento del ensayo. Se puede concluir que este material tiene una mayor deformación en cuanto más sea la duración de la carga y el valor de esta.

Para la determinación del esfuerzo admisible fue necesario verificar las condiciones geométricas de las fibras tomadas para el ensayo. Dado que la fuerza de resistencia está en toneladas, se convirtieron los resultados a KN para obtener un valor de esfuerzo en MPa.

Se realizó un análisis estadístico para la obtención de los esfuerzos admisibles, a partir de los datos anteriores. El promedio (MPa) es el esfuerzo del ensayo de tracción paralela ( $\sigma_{ut}$ ), el cual se calculó teniendo en

cuenta la fuerza ejercida sobre cada probeta llevada al fallo por tracción y las propiedades geométricas de cada probeta, el valor del percentil 5 y la varianza (Tabla 7).

Tabla 8. Análisis estadístico para la tracción paralela.

| Compresión paralela a la fibra |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|
| Datos                          | Medio  | Total  |
| Nº de datos                    | 15     | 15.00  |
| Promedio (MPa)                 | 54.60  | 54.603 |
| Desvest (MPa)                  | 12.96  | 12.96  |
| Coef var %                     | 23.73  | 23.74  |
| Percentil 5 (MPa)              | 38.72  | 38.72  |
| Varianza                       | 167.97 | 167.97 |

Tabla 9. Esfuerzo admisible según NSR-10.

| Ensayo            | Valor característico | Esfuerzo admisible NSR-10 |
|-------------------|----------------------|---------------------------|
| Tracción paralela | 32.31                | 5.385                     |

El esfuerzo admisible se determinó usando la ecuación G.12.7-2 de la norma NSR-10, mencionada anteriormente. Se afecta con los factores de sollicitación para la determinación del esfuerzo admisible, mencionados en la Tabla 9 del presente capítulo, los cuales son constantes cuando representan un estado de sollicitación. Los resultados obtenidos en esta investigación arrojan un valor

de 5.38 MPa, teniendo en cuenta que este valor es directamente proporcional al valor característico.

Tabla 10. Esfuerzo admisible según ISO 22156:2004.[6]

| Ensayo            | Carga muerta (M) | Carga muerta + viva (M+V) | Carga muerta+ viva + viento (M+V+W) |
|-------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Tracción paralela | 7.181            | 8.976                     | 10.771                              |

Por último, se calculó el esfuerzo admisible según la norma internacional. En este caso se observa que los valores son mucho más altos que la norma colombiana, por lo que es necesario establecer y verificar los parámetros de diferencia entre las dos normas.

## Conclusiones

Las características físicas y mecánicas de la guadua utilizada en la investigación permiten utilizar este material en el diseño de estructuras que compiten por su costo beneficio con materiales comúnmente usados como el concreto y el acero. A pesar de ser un buen material, la guadua no se comporta muy bien cuando se corta o flexiona.

Se logró observar y analizar las propiedades de la *guadua angustifolia* oriunda del Departamento del Meta.

Se encontró que es un material que se comporta muy bien a las diferentes solicitaciones de carga, soportando hasta 2 toneladas de carga a tracción y a compresión paralela. Al comparar con varios estudios e investigaciones, observamos que esta guadua tiene capacidad de resistencia similar a la de otras regiones. También es importante señalar cómo las normativas mencionadas y referenciadas pueden arrojar resultados distintos, aunque el método para determinar el valor característico sea el mismo. Sin embargo, el esfuerzo admisible se determina de una forma distinta: la normativa ISO 22156:2004 tiene en cuenta factores de modificación muy diferentes a la normativa NSR-10, en la que el factor de seguridad y las cargas vivas, muertas y de viento son estándares. La normativa NSR-10 logra establecer factores de modificación con respecto a las diferentes condiciones a la que se puede someter la *guadua angustifolia*.

## Referencias

- [1] V. Carmiol-Umaña, “Bambú Guadua en puentes peatonales”, *Revista Tecnología en Marcha*. [Online]. vol. 23, n°. 1, pp. 29, nov. 2011. Disponible en: [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/131](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/131)
- [2] J. Stamm, M. Tesfaye y H. Girma, *Construction Manual with Bamboo*. Addis Ababa, 2014.
- [3] E. S. Delgado, *Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia*, tesis Ph.D., Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2008.
- [4] *Estructuras de bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los culmos de bambú. Métodos de ensayo*, Icontec, NTC 6413:2020, 2021.
- [5] *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, Asosismica, 2010.
- [6] ISO 22156:2004 Bamboo — Structural design, ISO, 2004.
- [7] C. Ardila, Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima, Colombia, tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Artes, Bogotá, 2013.
- [8] P. Luna, J. Lozano y C. Takeuchi, “Determinación experimental de valores característicos de resistencia para *Guadua angustifolia*”, *Maaderas. Ciencia y tecnología*, vol. 16, n°. 1, pp. 77-92, 2014.

- [9] J. M. Rojas Alvarado, J. Lizarazo-Marriaga, “Análisis de las propiedades mecánicas de la guadua angustifolia mediante técnicas estadísticas y redes neuronales”, en *II Simposio Internacional de Guadua y Bambú*, 4 y 6 de agosto de 2014, pp. 16-24.
- [10] O. Hidalgo. *Manual de construcción con bambú guadua*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1976.

---

**Inventario de movimientos en masa  
dentro del Resguardo Indígena  
Kankuamo al suroriente de la Sierra  
Nevada de Santa Marta, Valledupar,  
Colombia**

**Inventory of mass movements within the  
Kankuamo Indigenous Reservation in the  
southeast of the Sierra Nevada de Santa Marta,  
Valledupar, Colombia**

---

**Oscar Enrique Forero Ospino**

Doctorando en Ciencias de la Tierra, Universidad de Granada  
ofoero@correo.ugr.es

**Resumen:** la Sierra Nevada de Santa Marta es un complejo geológico ubicado en la región del Caribe colombiano con influencia de procesos activos de modelado del terreno, condiciones climáticas y geomorfológicas específicas, lo que genera un cambio y modificación en las propiedades y parámetros geotécnicos de los materiales del sitio. Así mismo, muchas de sus inmediaciones se encuentran ocupadas por grupos étnicos, denominados resguardos indígenas, por lo que considerar los cambios actuales del terreno, las actividades y las variaciones en coberturas por uso del suelo es esencial para conocer y asegurar el bienestar de las comunidades y las prácticas de sus actividades. En los últimos años se han presentado problemas de movimientos en masa en toda el área, con daños considerables en los asentamientos indígenas, confinamiento de productos y deterioro de las viviendas. Así, las comunidades y los entes gubernamentales buscan brindar solución y dar respuesta a estas problemáticas. Dentro de este estudio se pretende dar a conocer los procesos geológicos que han modificado las condiciones actuales de las comunidades.

**Palabras clave:** deslizamientos; inventario; movimientos en

masa; resguardo indígena; riesgos geológicos.

**Abstract:** The Sierra Nevada de Santa Marta is a geological complex in the Colombian Caribbean region. It is influenced by active terrain modeling processes and specific climatic and geomorphological conditions, which generate a change and modification in the properties and geotechnical parameters of the site's materials. Likewise, many of its surroundings are occupied by ethnic groups, called indigenous reservations, so considering the current changes in the terrain, activities and variations in land use cover is essential to know and ensure the welfare of the communities and the practices of their activities. In recent years, there have been problems of mass movements throughout the area, with considerable damage to indigenous settlements, confinement of products and deterioration of housing. Thus, the communities and government entities are seeking solutions and responses to these problems. The purpose of this study is to provide information on the geological processes that have modified the current conditions of the communities.

**Keywords:** Landslides; inventory; mass movements; indigenous reservation; geological risks.

## Introducción

La creciente ocurrencia de afectaciones por movimientos en masa se ha extendido por todo el mundo. Los movimientos en masa son un peligro natural común con mayores impactos socioeconómicos en los países tropicales y en desarrollo [1]. La Sierra Nevada de Santa Marta cuenta con todas estas características, además del aumento de la ocupación de áreas disponibles por los indígenas pertenecientes a los resguardos y cabildos para los sectores de Atánquez y La Mina (Kankuamos), corregimientos del municipio de Valledupar, Cesar. Asimismo, las diferentes actividades y el desarrollo económico de las comunidades se ven afectados por los cambios en la intensidad de fenómenos naturales provocados por los cambios climáticos y las condiciones climático-ambientales de la región. Por esto, las unidades de gestión del riesgo de desastres, planeación y ordenamiento territorial se han interesado por esta zona.

El objetivo principal de esta investigación es brindar herramientas a la comunidad indígena y al municipio de Valledupar para la toma de decisiones en temas de planeación, expansión y ordenamiento del territorio a partir de la evaluación de las condiciones actuales de los sectores de Atánquez

y La Mina en temas relacionados con el cálculo de la susceptibilidad, peligrosidad, vulnerabilidad de las viviendas y evaluación del riesgo por movimientos en masa.

Desde la década de 2010, prácticamente toda la investigación sobre la susceptibilidad y el mapeo de peligros usa herramientas digitales para el manejo de datos espaciales como GIS, GPS y teledetección. El GIS ha determinado, hasta cierto punto, el estado actual de la técnica en la evaluación de peligros y riesgos de movimientos en masa [2]. Esta herramienta aborda de forma general las variables de litología (geología), parámetros geomorfológicos y topográficos (pendientes, orientación, etc.) y un adecuado inventario de movimientos en masa para la aplicación de métodos probabilísticos en el cálculo de susceptibilidad que, junto con el análisis de detonantes, permite determinar la peligrosidad del área de interés.

En la actualidad, la evaluación del riesgo por movimientos en masa se considera una estrategia de gestión de riesgos que tiene como objetivo principal reducir los riesgos y pérdidas [3]. Esta evaluación requiere de un conocimiento integral y holístico relacionado con los desastres a nivel local, incluido el riesgo de movimientos en masa [4].

En las últimas décadas, el enfoque de los análisis y evaluaciones del riesgo ha sido cualitativo. Sin embargo, para el caso en particular se abordará desde un enfoque cuantitativo probabilístico (frecuencia). Este enfoque se logra incorporando una posibilidad de generación de movimientos en masa en el cálculo de susceptibilidad y la cuantificación de los riesgos para la actualidad. Según Fell et ál. [5], existe una necesidad cada vez mayor de principios de gestión de riesgos cuantitativos que requieren el uso de métodos cuantitativos para la zonificación de la peligrosidad y el riesgo por movimientos en masa.

## Materiales y métodos

### Análisis de la susceptibilidad

Para el modelo de la susceptibilidad por movimientos en masa se realizó una estimación mediante la implementación de SIG. Actualmente para la estimación de la susceptibilidad mediante SIG existen varios métodos, pero el utilizado en este proyecto ha sido el método de la matriz mediante el uso de SIG [6]. Para este modelo se requiere un detallado inventario de movimientos en masa y la selección de los factores determinantes para el

análisis.

El método de la matriz se considera un método de análisis estadístico. Una vez seleccionado el conjunto de factores contribuyentes con la generación de movimientos en masa, también conocidos como factores determinantes, se construye una matriz, de modo que cada una de sus celdas representan una de las combinaciones de las clases de los factores considerados [7]. Al continuar con la matriz de movimientos en masa se hace necesario el cálculo del área afectada por movimientos en cada combinación de factores y de forma similar se debe crear la matriz para la zona de estudio, que representará el área total de cada combinación de factores.

El cruce final se da entre las matrices de movimientos en masa y la de la zona de estudio. Este cruce da como resultado la matriz de susceptibilidad que resulta de la división de la matriz de movimientos entre los valores de la matriz de la zona. Cualquier combinación que no está asociada a movimientos en masa se les asigna el valor 0 dentro de la matriz de susceptibilidad. Los demás tendrán valores mayores que 0, con alcance a 1 como máximo (Figura 1) [8].

### A. Matriz de movimientos de ladera

| Litología | Exposición |     |   |    |
|-----------|------------|-----|---|----|
|           | N          | E   | S | W  |
| A         | 71         | 16  | 0 | 0  |
| B         | 63         | 121 | 0 | 0  |
| C         | 90         | 31  | 0 | 15 |
| D         | 0          | 18  | 0 | 12 |
| E         | 0          | 22  | 4 | 9  |
| Pendiente |            |     |   |    |
| M N O P   |            |     |   |    |

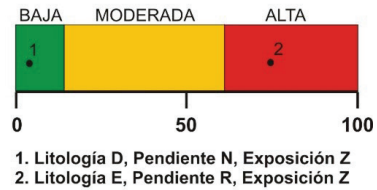
### B. Matriz de toda la zona

| Litología | Exposición |     |     |     |
|-----------|------------|-----|-----|-----|
|           | N          | E   | S   | W   |
| A         | 210        | 90  | 6   | 66  |
| B         | 230        | 631 | 29  | 110 |
| C         | 710        | 122 | 38  | 98  |
| D         | 135        | 310 | 125 | 23  |
| E         | 90         | 89  | 10  | 12  |
| Pendiente |            |     |     |     |
| M N O P   |            |     |     |     |

### C. Matriz de susceptibilidad

| Litología | Exposición |                |    |                 |
|-----------|------------|----------------|----|-----------------|
|           | N          | E              | S  | W               |
| A         | 34         | 18             | 0  | 0               |
| B         | 27         | 19             | 0  | 0               |
| C         | 13         | 25             | 0  | 15              |
| D         | 0          | 6 <sup>1</sup> | 0  | 52              |
| E         | 0          | 25             | 40 | 75 <sup>2</sup> |
| Pendiente |            |                |    |                 |
| M N O P   |            |                |    |                 |

### D. Clase de susceptibilidad en cada celdilla



**Figura 1.** Susceptibilidad a los movimientos en masa mediante el método de la matriz. Tomado de [8].

## Resultados

Actualmente el proyecto avanza con la fotointerpretación (Figura 2) del área de estudio apoyado en imágenes satelitales y fotografías aéreas del sitio, lo que permite una adecuada planeación de rutas y puntos de control durante la campaña de campo. La fotointerpretación está enseñando la zona en la que se espera encontrar

mayor concentración de movimientos en masa que, para el caso en particular, se trata de la zona sur, en la parte baja de Atánquez y La Mina dentro del resguardo. Por otro lado, se logran evidenciar procesos erosivos al norte del sector, los cuales son asociados a la incidencia directa del cambio de alturas en la evolución y generación de estos fenómenos naturales (Figura 3).

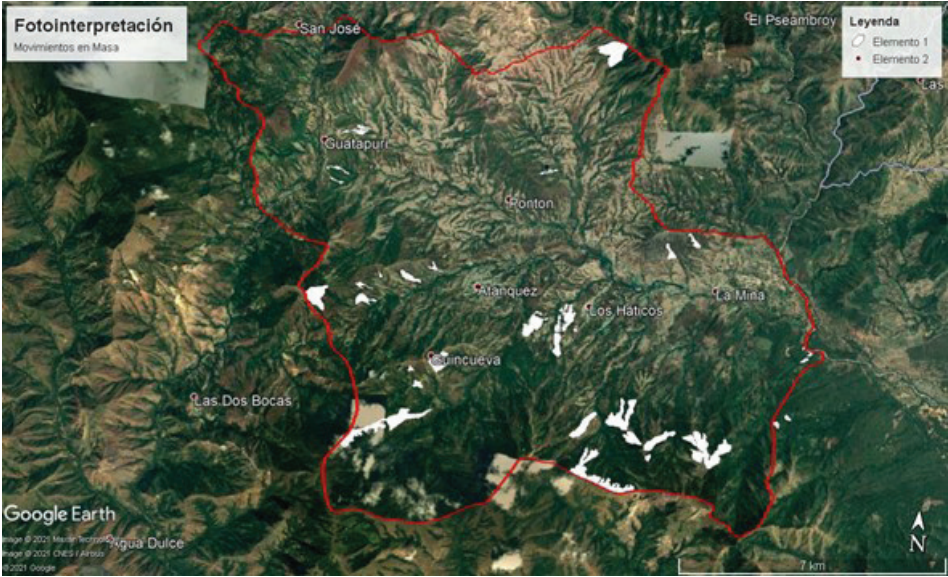


Figura 2. Fotointerpretación de movimientos en masa (mm).

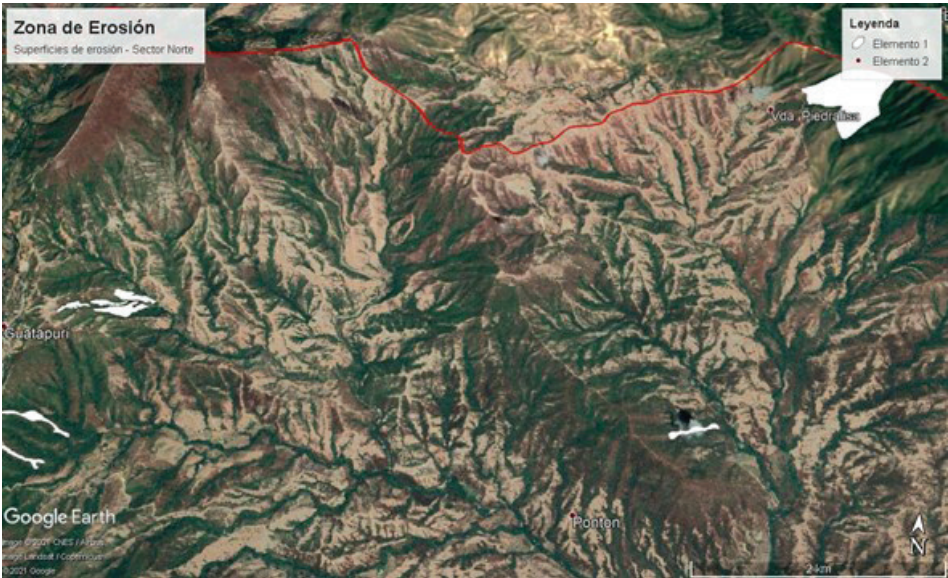
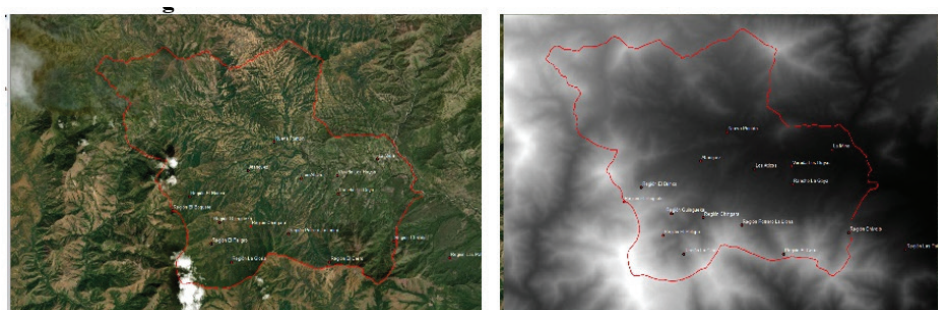


Figura 3. Zona con influencia de procesos erosivos.

Toda fotointerpretación acompaña a la información recolectada en el orden geológico- geomorfológico. Los mapas a escalas regionales y la cartografía base (curvas, vías, drenajes,

etc.) son necesarios para interpretar y acoplar las variables con la información suministrada por parte del modelo digital de elevaciones (DEM, por su sigla en inglés) (Figura 4).



**Figura 4.** Comparación de imagen satelital con DEM.

Los resultados de la fotointerpretación de las variables y los procesos activos dentro del área de estudio se consideran insumos importantes para la construcción de mapas de susceptibilidad y peligrosidad. El análisis de las imágenes anteriores permite identificar las áreas perimetrales del sector de análisis con las mayores alturas y la acumulación de los procesos morfodinámicos en estos sectores: desde el cambio de litología y las condiciones de escorrentía, hasta el componente pluviométrico.

## Conclusiones

Los parámetros encontrados dentro de los movimientos en masa registrados en el Resguardo Indígena presentan, principalmente, mecanismos asociados a deslizamientos rotacionales y traslacionales, caídas de rocas y detritos, movimientos completos (combinación de mecanismos de deslizamientos y flujos) y algunos flujos con acumulación de material en forma de cono.

La cronología de los movimientos tiene relación directa con eventos de la ola invernal del 2012. Aun cuando algunos presentan edades mucho más antiguas, su reactivación se da por la acumulación de agua durante eventos de precipitación prolongados. La principal litología afectada por los diferentes movimientos es la Unidad Jurásica del Batolito de Atánquez que, gracias a su condición de meteorización en algunos sectores, permite la presencia y desarrollo de diferentes mecanismos a partir de factores detonantes similares.

A partir del inventario de movimientos en masa se logran identificar los principales elementos territoriales que pueden verse afectados durante la ocurrencia de un evento de grandes magnitudes. Adicionalmente, se puede observar la condición actual de muchos elementos y el impacto que puede llegar a tener para la comunidad al verse afectado durante un fenómeno de remoción en masa.

El inventario de movimientos en masa es un insumo primordial para

el análisis de la susceptibilidad en la zona, pues permite comprender las condiciones del terreno y cómo la comunidad puede accionar y gestionar en las áreas circundantes a los eventos. Así, se pueden evitar daños o pérdidas de bienes dentro del Resguardo indígena, daños que limitan el desarrollo de la comunidad dentro del departamento del Cesar.

## Agradecimientos

Agradezco a mi director de tesis, Jorge David Jiménez Perálvarez, por todo su acompañamiento durante este primer año de curso; a mi tutora Rosa María Mateus Ruiz, por todo el apoyo incondicional. A mi esposa, Franci Dajanna Gómez Mendoza, y a mi hijo, Santiago Forero Gómez, por ser ese empuje durante todo este tiempo. La motivación de mis padres, Óscar Enrique Forero y Nhora Esther Ospino, sumado al apoyo de mis hermanos Samuel Francisco y Nhora Milena.

## Referencias

- [1] A. Quesada-Román, “Landslide risk index map at the municipal scale for Costa Rica”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 56, pp. 102144, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ij-drr.2021.102144>.
- [2] C. J. van Westen, E. Castellanos y S. L. Kuriakose, “Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview”, *Engineering Geology*, vol. 102, n° 3, pp. 112-131, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eng-geo.2008.03.010>.
- [3] United Nations Office for Disaster Risk Reduction. *International Strategy for Disaster Reduction*, 4 ed., 2015.
- [4] D. Cruden, ed. *Landslide Risk Assessment*. London: Routledge, 2018.
- [5] R. Fell *et al.* “Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning”, *Engineering Geology*, vol. 102, n° 3, pp. 99-111, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eng-geo.2008.03.014>.
- [6] C. Irigaray, *Movimientos de ladera: inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un sistema de información geográfica (S.I.G.). Aplicación a las zonas de Colmenar (Ma), Rute (Co) y Montefrío (Gr)*, tesis PhD, Universidad de Granada, 1995.
- [7] J. Perálvarez *et al.* “Elaboración de un modelo para el análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un sistema de información geográfica”, en *XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, Granada, septiembre 2006, pp. 265-280.
- [8] C. Irigaray, *Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un Sistema de Información Geográfica*, Memoria de doctorado, Universidad de Granada, 1999.



---

# **Evaluación del uso de sensores remotos en la identificación de daños superficiales en el pavimento**

---

**Martín Flórez Mesa**

Estudiante de Maestría en Infraestructura Vial,  
Universidad Santo Tomás, Bogotá  
martinflorez@usantotomas.edu.co

**Jessica Ramírez Cuello**

Magíster en Ingeniería Civil. Docente tiempo completo,  
Universidad Santo Tomás, Villavicencio  
jessicaramirezc@usantotomas.edu.co

**Resumen:** en esta investigación se evaluó el uso de sensores remotos (VANT DJI Phantom 4), en la identificación de daños superficiales de pavimento en un tramo vial. El levantamiento y registro de la información se realizó por medio de dos procedimientos: uno en equipo de cómputo, sobre imágenes georreferenciadas tomadas con el VANT; y el otro, el registro de fallos por medio de inspección visual *in situ* para tener una referencia de comparación. Con la información tomada en los dos procedimientos, se calculó el índice de deterioro del pavimento por las metodologías VIZIR y PCI.

La evaluación se realizó mediante la comparación de los índices de deterioro obtenidos, cuyos resultados muestran similitud. Se evidenció la viabilidad en el uso de VANTs, como método alternativo para la auscultación de pavimentos, mediante la toma de imágenes georreferenciadas de alta resolución, que son utilizadas en equipo de cómputo para registrar los deterioros del pavimento.

**Palabras clave:** imágenes georreferenciadas; índice de condición del pavimento (PCI); índice de condición de deterioro superficial (IS); pavimento; VANT; Vizir.

## Introducción

Con el acelerado desarrollo de la tecnología en todos los campos del conocimiento, los ingenieros enfocados en el área de la infraestructura vial acceden a procedimientos más eficientes y controlables. Esto les permite obtener información primaria de problemas de ingeniería que requieren fuentes de datos altamente confiables, para plantear y desarrollar las mejores soluciones desde diferentes puntos de vista.

Una de las disciplinas que ha tenido grandes avances es la geomática, lo que ha facilitado el uso de sensores remotos en campos del conocimiento como la cartografía, la agronomía, la ecología, la meteorología, los estudios ambientales, la industria militar, entre otros. Igualmente, son importantes los avances de la fotogrametría en el procesamiento y manejo de imágenes obtenidas con sensores remotos. Este tipo de tecnologías también se pueden usar en la ingeniería civil, como alternativa para obtener información rápida y confiable que nos lleve a resultados más favorables al momento de presentar soluciones.

Por otro lado, la infraestructura vial en nuestro país ha crecido a través de la modalidad de concesiones, sobre todo, en las vías de primer orden. Estas vías se mantienen en buen estado debido

a que en los contratos de concesión se establece un sistema de calificación y aceptación basado en un índice de estado, para mantener la vía en buenas condiciones de servicio [1], lo que ha beneficiado a los usuarios que las transitan. No ocurre lo mismo con las vías secundarias y terciarias que están a cargo de la nación, los departamentos y municipios. Esta red presenta un estado crítico y paulatinamente ha venido deteriorándose por la falta de mantenimiento debido a los bajos recursos que disponen los departamentos y la nación para inversión en infraestructura vial [2].

Para preservar esta infraestructura, se requiere una adecuada gestión vial, basada en inventarios detallados con el fin de identificar las fallas superficiales que indiquen el estado de deterioro de su pavimento y, con esto, planificar adecuada y oportunamente los mantenimientos preventivos. El deterioro temprano de los pavimentos nuevos y los que han tenido intervenciones de rehabilitación se relaciona con proyectos mal implementados que, en muchas ocasiones, son desarrollados sin un adecuado levantamiento de los deterioros del pavimento que muestre su estado actual y anticipe intervenciones oportunas [3], [4].

El levantamiento de deterioros del pavimento es una labor para un

ingeniero especialista, por medio de inspección visual a lo largo del tramo vial en estudio. Al respecto, se debe tener en cuenta el tiempo en la toma de información que se estima en un promedio de 500 m día [5], dado que se hace caminando, metro a metro, en cada tramo de calle o carretera que se esté evaluando, lo que implica esfuerzo físico y exposición a riesgos de seguridad vial.

Por lo anterior, este proyecto de investigación usó sensores remotos, en particular el VANT (vehículo aéreo no tripulado), del modelo DJI Phantom 4, para el levantamiento de información de campo correspondiente a daños superficiales de pavimentos en infraestructura vial, con el fin de obtener su estado de deterioro en un tramo de vía piloto. Se utilizaron las metodologías VIZIR y PCI con el fin de ampliar el campo de soluciones alternativas, confiables y a bajo costo en estudios de pavimentos y gestión vial.

## Marco teórico

### Gestión vial

La gestión de infraestructura vial es una disciplina de la ingeniería civil que permite diagnosticar, evaluar, planificar y programar objetivamente el mantenimiento de los activos viales

en toda su vida útil, optimizando el uso de los recursos disponibles [6].

### Geomática

El término geomática hace referencia a un conjunto de ciencias en las cuales se integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica. El término está compuesto por dos ramas: ‘geo’, tierra, y ‘mática’, por informática, es decir, el estudio de la superficie terrestre a través de la informática (tratamiento automático de la información). También es llamada información espacial o geoespacial [7].

### Fotogrametría

Fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología para obtener información confiable sobre objetos físicos y el medio ambiente, a través de procesos de registro, medición e interpretación de imágenes y patrones de energía radiante electromagnética y otros fenómeno [8].

### VANT (vehículo aéreo no tripulado)

Un vehículo aéreo no tripulado VANT, UAV (del inglés Unmanned Aerial Vehicle), UAS (del inglés Unmanned Aerial System) o RPAS (del inglés Remotely Piloted Aircraft System),

comúnmente conocido como dron, hace referencia a una aeronave y sus elementos asociados, que vuela sin tripulación ni piloto y ejerce su función remotamente. Un VANT es un vehículo reutilizable, capaz de mantener autónomamente un nivel de vuelo controlado, sostenido y propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción [9].

### **Pavement Condition Index (PCI)**

Este método fue desarrollado por el cuerpo de ingenieros de Estados Unidos y adoptado por The American Public Works Association and American Society for Testing and Materials (ASTM) [10]. El PCI es un indicador numérico, que califica y proporciona una medida actual de la condición del pavimento, basada en los fallos observados en la superficie. También indica la integridad estructural y la condición operativa de la superficie (rugosidad y seguridad localizadas). El PCI proporciona una base objetiva para determinar las necesidades y prioridades de mantenimiento y reparación. El monitoreo continuo del PCI se utiliza para establecer la tasa de deterioro del pavimento, lo que permite la identificación temprana de las principales necesidades de rehabilitación. Así mismo,

proporciona comentarios sobre el comportamiento del pavimento, para la validación o mejora del diseño actual y los procedimientos de mantenimiento [11].

### **VIZIR**

Es un método francés [12], adaptado en Colombia por el Instituto Nacional de Vías. El método clasifica los deterioros de los pavimentos asfálticos en dos categorías (A y B) y permite la determinación de un índice de deterioro superficial. Los deterioros del tipo A caracterizan una condición estructural del pavimento, ligada a las condiciones de las diversas capas del pavimento y el suelo de subrasante, así como a las capas asfálticas. Se trata de degradaciones debidas a insuficiencia en la capacidad estructural de la calzada, cuyo remedio suele requerir el conocimiento de otros criterios de valoración (ensayos de resistencia o de respuesta, deflexiones, etc.). Los deterioros del tipo B son, en su mayoría, de tipo funcional y dan lugar a reparaciones que generalmente no están ligadas a la capacidad estructural de la calzada. Su origen se encuentra en deficiencias constructivas y en condiciones locales particulares que el tránsito ayuda a poner en evidencia. Entre los deterioros del tipo B se pueden citar las fisuras causadas por asuntos distintos a la fatiga, los

desprendimientos y los afloramientos. Para el inventario de los fallos sobre la superficie del pavimento, se divide el tramo vial en unidades de muestreo de 100 m de longitud [12][13].

## Metodología

El trabajo se desarrolló en cuatro etapas, como se muestra en la Figura 1:

### Identificación del tramo piloto

Dado que la investigación se enfoca en el levantamiento de daños superficiales en pavimentos de vías secundarias, se identificaron varios tramos viales en Bogotá y alrededores, que presentan características adecuadas para desarrollar el trabajo. Estas son vías

secundarias con pavimento flexible y con deterioros visibles.

Se determinó tomar como tramo piloto 1.0 km de la parte inicial de la vía Siberia-Tenjo (K0+000 – K1+000), dada la cercanía a Bogotá, pues facilitaba el desplazamiento al sitio.

### Trabajo de campo

Para lograr los objetivos planteados, se realizó un trabajo de campo, conformado por dos actividades, a saber:

#### *Levantamiento de fallos de pavimento mediante inspección visual*

Antes de iniciar esta actividad, se dividió el tramo de estudio en segmentos o unidades de muestreo de 40 m a lo largo de la vía para poder realizar la

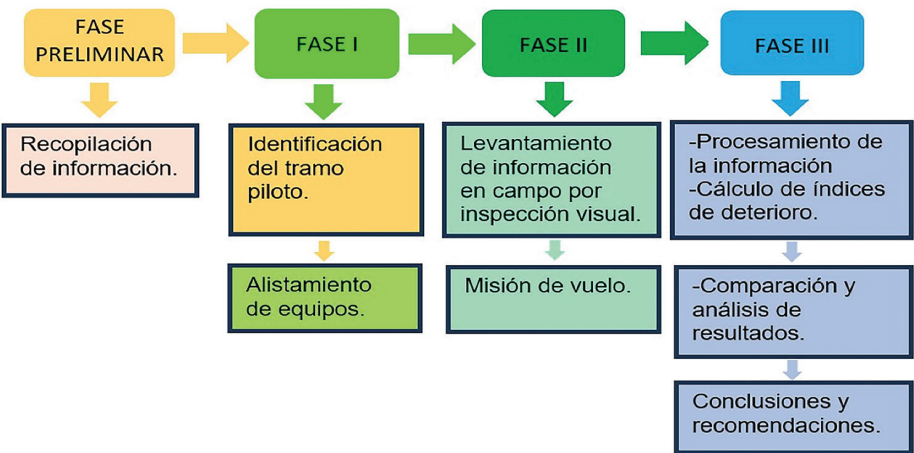


Figura 1. Etapas de proyecto.

comparación con las metodologías PCI y VIZIR, de acuerdo con los objetivos del trabajo planteados. La medida de las unidades de muestreo se estableció de acuerdo con la metodología PCI, en la que se indica que el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango  $230.0 \pm 93.0 \text{ m}^2$  [14]. La metodología VIZIR indica unidades de muestreo de  $100 \text{ m}$  [13]. Para este caso se estableció una longitud de unidad de muestreo de  $40 \text{ m}$ , teniendo en cuenta que la vía tiene un ancho promedio de  $6.0 \text{ m}$ . Una vez establecida la unidad de muestreo, se procedió a realizar la inspección visual del tramo vial, identificando y registrando paso a paso las diferentes fallas que se observaron en la superficie del pavimento, teniendo en cuenta su tipo, cantidad, severidad y dimensiones.

#### *Levantamiento de información con VANT DJI Phantom 4*

La otra actividad de campo consistió en realizar la toma de imágenes de alta resolución mediante el VANT DJI Phantom 4, en una misión de vuelo a lo largo del tramo vial en estudio, debidamente diseñada y ejecutada por un piloto certificado que garantiza la seguridad del procedimiento y la confiabilidad de la información. En cuanto a la calidad de las imágenes, para este estudio se estableció como parámetro un GSD o resolución  $< 2.0$

cm de pixel, que se obtiene con una altura de vuelo de  $45 \text{ m}$  [15].

## **Trabajo de oficina**

### *Procesamiento de imágenes tomadas con el VANT*

En el equipo de cómputo y con ayuda del software de fotogrametría Pix4D Mapper se procesó la información tomada en campo con el VANT DJI Phantom 4, para luego generar imágenes georreferenciadas de todo el corredor en estudio. A partir de estas imágenes se generó un mosaico que une en una sola franja todas las imágenes denominado ortofotomosaico.

Con ayuda del software Civil3D, el ortofotomosaico obtenido se dividió en los segmentos que conforman las unidades de muestreo definidas a lo largo de la vía del estudio, para su clasificación y cálculo.

### *Inventario de fallas del pavimento, utilizando las imágenes tomadas mediante el VANT DJI Phantom*

Sobre el mosaico de ortofotos generado y segmentado, se hizo la identificación e inventario de los diferentes tipos de fallas, en las unidades de muestreo establecidas. Se realizaron mediciones de longitud o área según el tipo de falla, de

manera precisa, directamente sobre el ortofotomosaico, con ayuda del software Civil3D. Esta información junto con la severidad de cada falla se registró en los formatos respectivos y elaborados en hoja de cálculo.

### **Cálculo del índice de condición del pavimento**

En equipo de cómputo y con ayuda de la hoja de cálculo Excel, se procesaron y tabularon los registros de fallas obtenidas mediante la inspección visual en campo y en equipo de cómputo sobre imágenes tomadas con el VANT, a lo largo de la vía del estudio. Luego se aplicaron las ecuaciones y cálculos de acuerdo con lo indicado por las metodologías PCI y VIZIR, para finalmente obtener el índice de condición de estado del pavimento (PCI) y el índice de deterioro superficial (IS) en la vía del estudio.

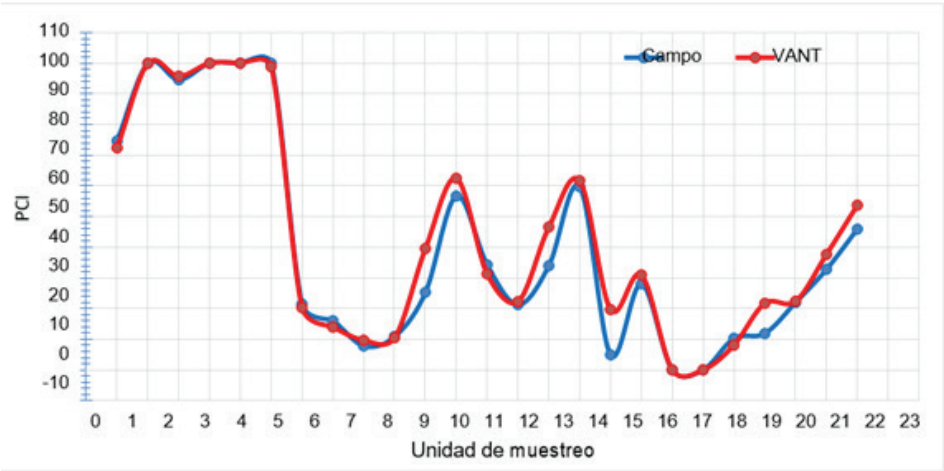
## **Resultados**

Luego de aplicar las metodologías VIZIR y PCI a la información

levantada en campo y sobre imágenes georreferenciadas, se obtuvieron cuatro (4) índices de estado del pavimento para el tramo vial del estudio, cuyos resultados fueron objeto de comparación y análisis.

### **Comparación y análisis PCI**

Los resultados muestran una diferencia de 2.4 unidades en el PCI y la condición que se obtiene para el pavimento es regular en los dos procedimientos. En la Figura 2 se observa que los resultados del PCI son similares en cada una de las unidades de muestreo a lo largo del tramo vial estudiado, y las desviaciones o diferencias que se presentan no son significativas en el estado o condición del pavimento. Entonces, el uso de imágenes georreferenciadas tomadas con VANT DJI Phantom 4 para el levantamiento de fallos o deterioros de pavimento es confiable, usando la metodología PCI, y representa una alternativa como herramienta en la gestión vial (Tabla 1).



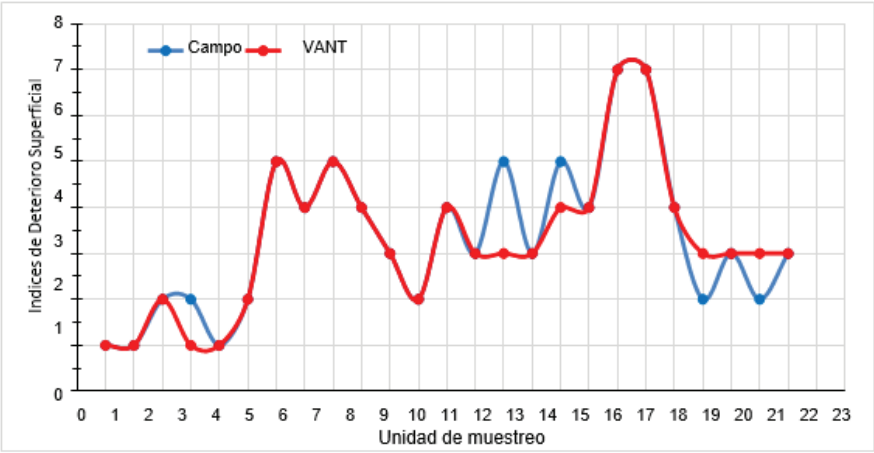
**Figura 2.** Comparación PCI entre resultados obtenidos en campo y los tomados con VANT.

**Tabla 1.** Comparación de resultados de la inspección visual versus el equipo de cómputo georreferenciado.

|                                                                               | PCI del tramo vial en estudio | Condición |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------|
| Levantamiento de fallas por inspección visual en campo                        | 40.67                         | Regular   |
| Levantamiento de fallas en equipo de cómputo sobre imágenes georreferenciadas | 43.072                        | Regular   |

## Comparación y análisis VIZIR

En la Figura 3, se observan resultados similares en los valores del IS calculado con la información de deterioros obtenida por los dos procedimientos en la mayoría de las unidades de muestro a lo largo del tramo vial estudiado (Tabla 2).



**Figura 3.** Comparación de resultados obtenidos entre visita campo y los tomados con VIZIR.

**Tabla 2.** Comparación de resultados inspección visual versus equipo de cómputo georreferenciado VIZIR.

|                                                                               | PCI del tramo vial en estudio | Condición |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------|
| Levantamiento de fallas por inspección visual en campo                        | 3.36                          | marginal  |
| Levantamiento de fallas en equipo de cómputo sobre imágenes georreferenciadas | 3.28                          | marginal  |

Se evidencian diferencias o desviaciones en las unidades 4, 15, 17, 22 y 24. Estas desviaciones se deben principalmente a que, en las imágenes tomadas con el VANT, no se aprecian claramente algunas fallas del grupo A

de tipo estructural. Estas fallas tienen un peso importante en el cálculo del IS final, tal como ahuellamientos o hundimientos, pero no es posible apreciarlas en una imagen ortogonal, debido a que tienen un componente vertical.

No obstante, el resultado del IS final promedio para el tramo vial en estudio es muy cercano en su valor con una diferencia de apenas 0.08, lo que nos da la misma categoría del IS, marginal, con los dos procedimientos.

En términos generales se evidencia que el IS obtenido con la metodología VIZIR, a partir de los procedimientos de inspección visual en campo y de inspección visual sobre imágenes VANT, es comparable. Esto indica que el uso de imágenes georreferenciadas

tomadas con el VANT DJI Phantom 4, para la inspección del pavimento, proporciona resultados satisfactorios.

## Conclusiones

Se evaluó el uso de sensores remotos en la identificación de daños superficiales en el pavimento, mediante imágenes tomadas con un VANT DJI Phantom 4 y con el procedimiento convencional de inspección visual *in situ*, mediante las metodologías VIZIR y PCI. Se compararon los resultados obtenidos en ambos procedimientos.

De acuerdo con la información tomada en campo por medio de inspección visual por medio de inspección visual sobre imágenes tomadas con el VANT DJI Phantom 4, se puede afirmar que, en términos generales, los registros muestran similitud en la identificación de deterioros y en sus medidas.

Respecto a los resultados obtenidos en el cálculo del Índice de Condición del Pavimento (metodología PCI) y del Índice de Deterioro Superficial IS (metodología VIZIR), se observa una similitud en los dos procedimientos.

La investigación arrojó resultados favorables para la implementación, como método alternativo, del uso de drones o VANTs, con el fin de tomar imágenes georreferenciadas de alta

resolución y utilizarlas para registrar las fallas o deterioros del pavimento en un tramo vial. Con esto se evidencia que los resultados esperados de la investigación y descritos en el anteproyecto son positivos.

## Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Santo Tomás, seccional Bogotá, por el programa ofrecido de Maestría en Infraestructura Vial; a la ingeniera Jéssica Ramírez y al ingeniero Jaime Duarte, por su orientación y apoyo durante esta investigación como directora y codirector; y a la ingeniera Adriana Arévalo, por su orientación en la clase de proyecto de grado, durante el programa de Maestría en Infraestructura Vial.

## Referencias

- [1] T. Yepes, J. M. Ramírez, L. Villar *et al.*, *Infraestructura de transporte en Colombia* Bogotá: Centro de Investigación Económica y Social, 2013.
- [2] N. Zamora Fandiño y O. L., Barrera Reyes. *Diagnóstico de la infraestructura vial actual en Colombia*, tesis de especialización, Universidad EAN, Bogotá, 2012.

- [3] D. Cardoso Parente, N. Carvalho Felix y A. Pessoa Picanço. “Uso de vehículo aéreo no tripulado (VANT) en la identificación de falla superficial en pavimento asfáltico”, *Revista ALCONPAT*, vol. 7, n° 2, pp. 160-171, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.161>.
- [4] S. A. Vieira, A. A. E. P. Júnior, F. H. L. Oliveira, *et al.* “Análise comparativa de metodologias de evaluación de pavimentos por medio do IGG e PCI”. *Conexões - Ciência e tecnologia*, vol. 10, n°. 3, pp. 20- 30, 2016. DOI: <http://doi.org/10.21439/conexoes.v10i3.799>
- [5] J. O. Cruz Toribio y J. W. Gutiérrez Lazares, “Evaluación superficial de vías urbanas empleando vehículo aéreo no tripulado (VANT). Pavement surface evaluation of urban roads using an unmanned aerial vehicle (UAV)”. *Revista Métodos & Materiales*, vol. 8, 2018, pp. 23-31.
- [6] H. Solminihaç, T. Echaveguren y A. Chamorro, *Gestión de Infraestructura Vial*. Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile, 2018.
- [7] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). “Administración Geomática”. <https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/administracion-geomatica> (consultado en mar. 7 2023).
- [8] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). <https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.htm> (consultado en mar. 7 2023).
- [9] European Aviation Safety Agency (EASA). 2020. <https://www.easa.europa.eu> (consultado en mar. 7 2023)
- [10] N. Attoh-Okine y O. Adarkwa, *Pavement Condition Surveys – Overview of Current Practices*. USA: Delaware Center for Transportation, 2013.
- [11] ASTM D6433-18, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org) (consultado en mar. 7 2023)
- [12] LCPC1. *VIZIR, méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins de entretien d'un réseau routier*. Paris, 1991.
- [13] Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2008.
- [14] L. R. Vásquez Varela, *Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras*. Manizales: Ingepav, 2002.
- [15] PIX4D. <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>

---

# **Simulación híbrida en tiempo real de una tribuna de acero con un amortiguador de fricción semiactivo para la reducción de la respuesta vertical**

## **Real-Time Hybrid Simulation of a Steel Structure Type Tribune with a Semi-Active Friction Damper for Vertical Response Reduction**

---

**Alexander Solarte Benavides, MSc.**

Docente Tiempo Completo, Universidad Santo Tomás,  
Villavicencio, Colombia

[alexandersolarte@usantotomas.edu.co](mailto:alexandersolarte@usantotomas.edu.co)

**Johannio Marulanda C., Ph. D.**

Docente de Planta, Universidad del Valle, Cali, Colombia

[johannio.marulanda@correounivalle.edu.co](mailto:johannio.marulanda@correounivalle.edu.co)

**Peter Thomson, Ph. D.**

Docente de Planta, Universidad del Valle, Cali, Colombia

[peter.thomson@correounivalle.edu.co](mailto:peter.thomson@correounivalle.edu.co)

**Resumen:** los amortiguadores de fricción semiactivos (AFS) han sido identificados como dispositivos de control eficientes para la mitigación de riesgos en estructuras civiles. Las pruebas experimentales son importantes para verificar el desempeño de los dispositivos de disipación de energía en estructuras. La metodología de simulación híbrida en tiempo real (RTHS) proporciona un medio práctico y rentable para realizar ensayos en escala real de estructuras con control semiactivo. En los ensayos de RTHS, los componentes críticos del sistema se prueban físicamente mientras el resto de la estructura se simula. Este artículo describe la evaluación del desempeño de un AFS para el control de la respuesta vertical de una estructura metálica tipo tribuna, empleando RTHS. La subestructura física de los ensayos híbridos es el AFS y la subestructura numérica es la tribuna de acero. El AFS se ubicó en el primer peldaño de la tribuna y generó reducciones del 98.2 % y 94.6 % para desplazamientos pico y RMS, respectivamente, en comparación con la estructura sin control.

**Palabras claves:** amortiguador de fricción semiactivo; control

estructural; simulación híbrida de tiempo real.

**Abstract:** Semi-active friction dampers (SFD) have been identified as an effective control device for hazard mitigation in civil structures. Experimental testing is important to verify the performance of SFDs for seismic protection. The real-time hybrid simulation methodology (RTHS) provides a practical and cost-effective mean for performing real-scale tests of structures with semi-active control systems. In the RTHS, the critical components of the system are physically tested while the rest of the structure is simulated. This paper describes the performance evaluation of an SFD for the control of the vertical response of a steel structure type tribune, using RTHS. The physical substructure for the hybrid tests is the SFD and the numerical substructure is the steel tribune. The SFD was located on the first rung of the tribune, and it achieved reductions of 98.2 % and 94.6 % for peak and RMS displacements, respectively, compared to the uncontrolled structure.

**Keywords:** Semiactive friction damper; structural control; real-time hybrid simulation.

## Introducción

En los últimos años, los sistemas de control estructural se han convertido en una alternativa para reducir las vibraciones excesivas [1], especialmente en edificios y puentes [2]. Los sistemas de control estructural se clasifican en cuatro grupos: sistemas pasivos, activos, semiactivos e híbridos [1, 3]. Los sistemas de control semiactivo combinan aspectos de control tanto pasivo como activo, que poseen una gran capacidad de fuerza y adaptabilidad sin la necesidad de grandes fuentes de energía [4]. Los dispositivos semiactivos incluyen amortiguadores de fricción/rigidez variable, amortiguadores de orificios variables, amortiguadores de fluidos controlables, entre otros [5].

Los amortiguadores de fricción (AF) se usan generalmente en edificios como sistemas de control estructural pasivos y añaden disipación de energía a través de mecanismos de amortiguación inducidos por fricción deslizante entre sus superficies [6]. Sin embargo, los amortiguadores de fricción semiactivos (AFS) son considerados una mejor alternativa en comparación con los AF pasivos, para la

protección sísmica de estructuras, pues disipan la energía a través de la fricción que genera el desplazamiento relativo entre la edificación y el dispositivo [7].

Ahora bien, para validar los desarrollos tecnológicos y aplicaciones del control estructural se requieren técnicas experimentales sofisticadas. Un método que está siendo implementado en la comunidad experimental es la simulación híbrida en tiempo real (RTHS). La RTHS se basa en el concepto de aislar y probar físicamente los componentes críticos de una estructura mientras el resto de la estructura se modela computacionalmente. Ambos componentes interactúan a través de mesas vibratorias o actuadores hidráulicos, que son los sistemas de transferencia, y de sensores de fuerza y momento, que son los sistemas de retroalimentación [8].

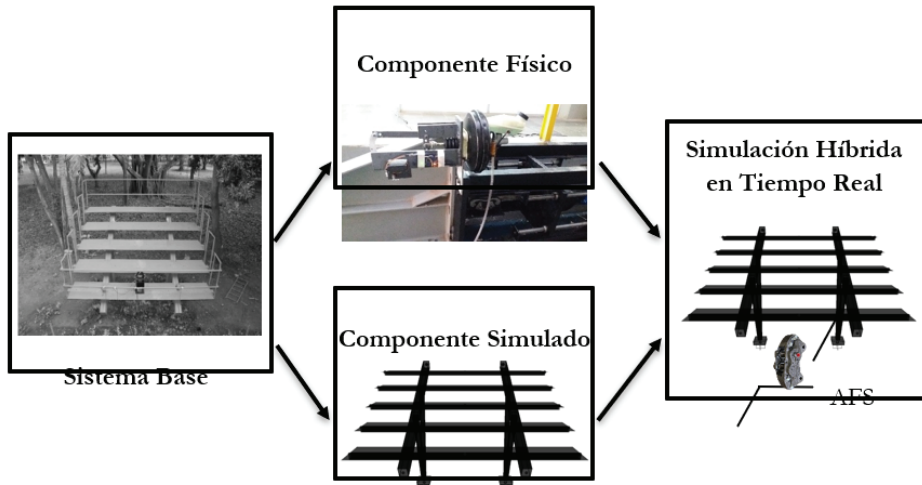
Los desplazamientos objetivo de los componentes físicos deben ser replicados por actuadores hidráulicos conectados a plataformas de *hardware* y *software* capaces de realizar cálculos iterativos paso a paso, junto con la información de los sistemas de retroalimentación [5]. Debido a la dinámica y a las limitaciones físicas

de los actuadores hidráulicos, pueden producirse retrasos en los ensayos experimentales y la mitigación de sus efectos es una parte esencial para la RTHS [9]. Para superar los retrasos, se han propuesto varios métodos de compensación, entre los cuales se encuentra el método de compensación de retardo de extrapolación polinomial [10].

Este artículo describe la simulación híbrida en tiempo real de un amortiguador de fricción semiactivo para verificar el control semiactivo en escala real para la protección sísmica. Primero se identifican los componentes simulados y físicos del experimento de simulación híbrida. A continuación, se presenta el método de prueba de simulación híbrida en tiempo real realizado en la Universidad del Valle, utilizando un actuador servo-hidráulico y se discute el uso de un compensador de retardo de extrapolación polinomial para proporcionar un mejor rendimiento.

## Componentes de la simulación híbrida en tiempo real

La RTHS proporciona la capacidad de aislar y probar físicamente componentes críticos de una estructura con control semiactivo. También permite realizar pruebas repetibles para examinar diversas estrategias de control y una variedad de excitaciones externas de manera eficiente y puntual. En la simulación híbrida, el experimento se divide en componentes simulados y físicos [10]. En la RTHS de este estudio, el componente simulado es una estructura de acero tipo tribuna sometido a una excitación armónica vertical, mientras que el componente físico consiste en un AFS. En la Figura 1 se representa un esquema del concepto de esta simulación híbrida en particular y los componentes simulados y físicos.

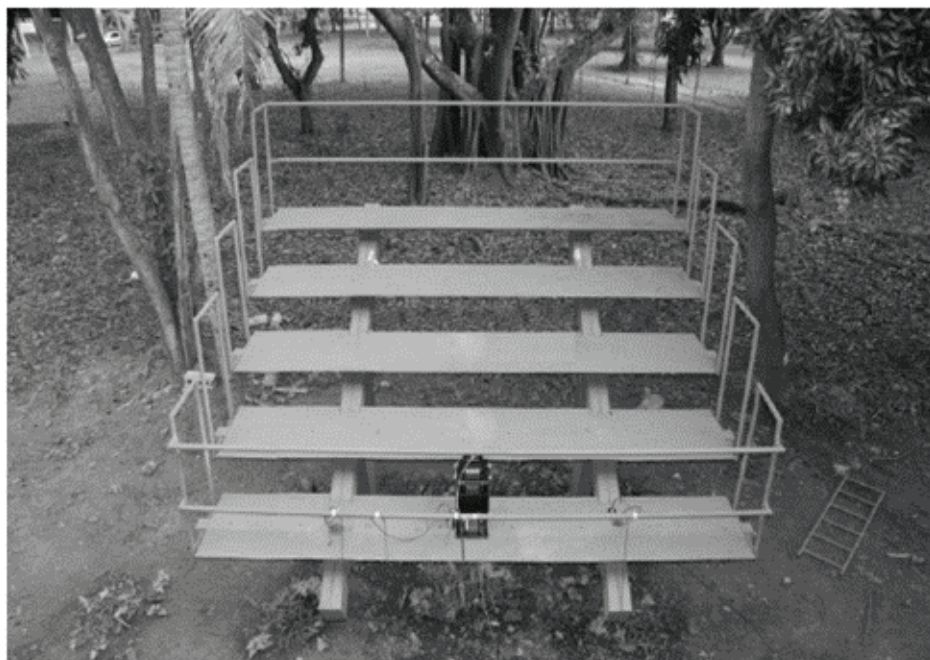


**Figura 1.** Esquema que representa la RTHS para una estructura con control semiactivo excitado sísmicamente.

## Componentes simulados

El componente simulado de la RTHS consiste en un modelo tridimensional de elementos finitos (EF) de una estructura metálica tipo tribuna que se construyó en la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, diseñada y construida con el fin de reproducir propiedades dinámicas similares a las de las tribunas del Estadio Olímpico Pascual Guerrero de Cali.

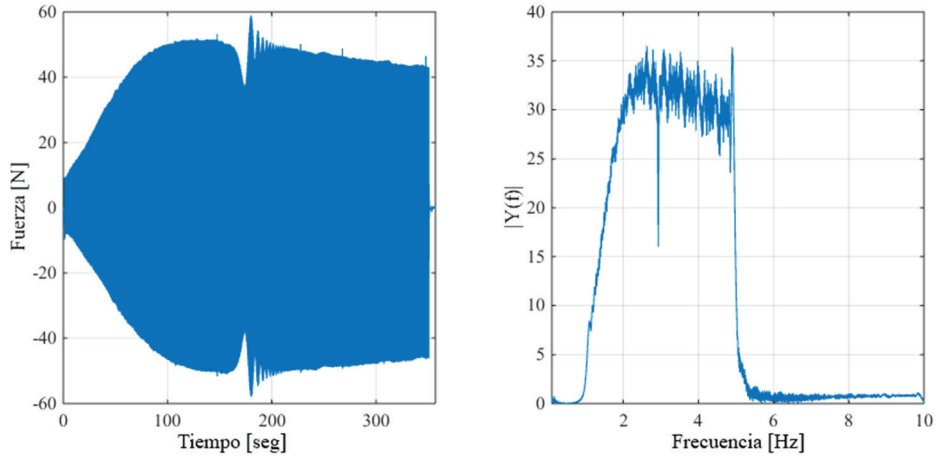
La estructura metálica de la tribuna se puede observar en la Figura 2. Consiste de dos pórticos conformados por dos columnas en forma de V, que están separados 2 m. Las columnas de cada pórtico están unidas por una viga inclinada de una longitud aproximada de 4 m. Adicionalmente, cada pórtico se encuentra unido por 5 vigas en forma de T que cumplen la función de peldaños.



**Figura 2.** Estructura metálica tipo tribuna.

Para conocer las propiedades dinámicas de la estructura, se realizó un ensayo de vibración forzada, registrando la respuesta en aceleración en el sentido vertical por medio de tres acelerómetros Endevco, modelo 752A13, ubicados estratégicamente. Los sensores se ubicaron en el último peldaño en el lado oriental y en el primer peldaño en el lado oriental y occidental. Se sometió la estructura a una excitación armónica vertical

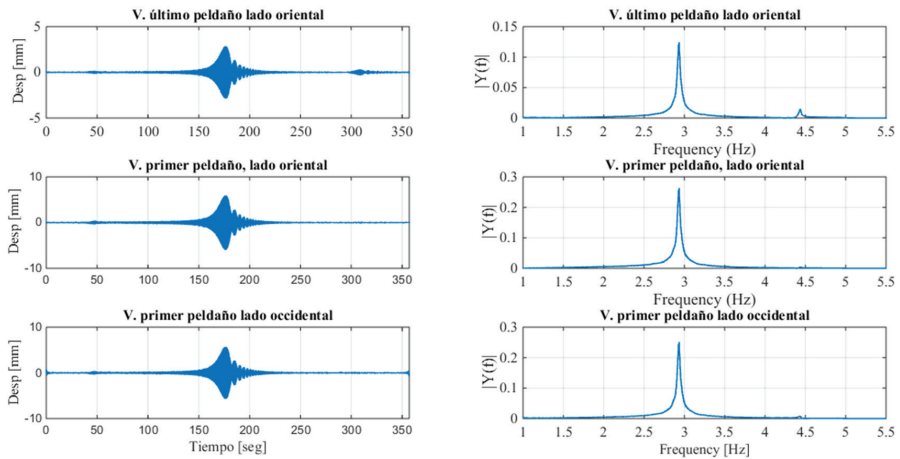
aplicada en el centro del primer peldaño mediante un excitador de masa electrodinámico (APS Dynamics Model 113). La señal de excitación fue un barrido lineal de frecuencias entre 1 y 5 Hz durante 360 s. La fuerza de excitación vertical aplicada a la estructura para validar el modelo numérico del ensayo se observa en la Figura 3, en el dominio de tiempo y frecuencia usando la transformada rápida de Fourier.



**Figura 3.** Excitación armónica aplicada en el primer peldaño de la estructura metálica tipo tribuna.

En la se observa en tiempo y en frecuencia, usando la transformada rápida de Fourier, la respuesta en desplazamiento de la estructura

según la ubicación de los sensores en la dirección vertical. Se logra apreciar la presencia del modo fundamental asociado a una frecuencia de 2.93 Hz.



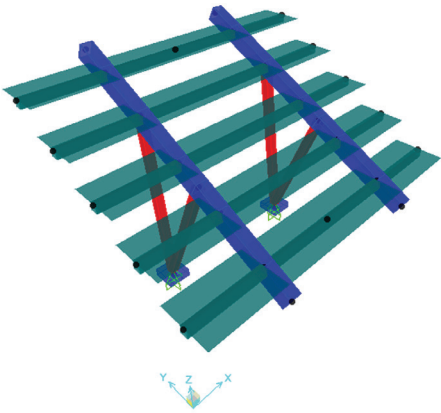
**Figura 4.** Respuesta en el dominio de tiempo y frecuencia de la estructura metálica tipo tribuna.

Se obtuvieron dos frecuencias naturales ( $f_n$ ), razones de amortiguamiento ( $\zeta$ ) y el tipo de movimiento de las formas modales ( $\phi$ ) de la estructura metálica tipo tribuna, las cuales se encuentran resumidas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Propiedades dinámicas de la estructura metálica tipo tribuna.

|               | $f_n$<br>[Hz] | $\zeta$ [%] | Movimiento |
|---------------|---------------|-------------|------------|
| <b>Modo 1</b> | 2.93          | 0.43        | Vertical   |
| <b>Modo 2</b> | 4.44          | 0.25        | Torsional  |

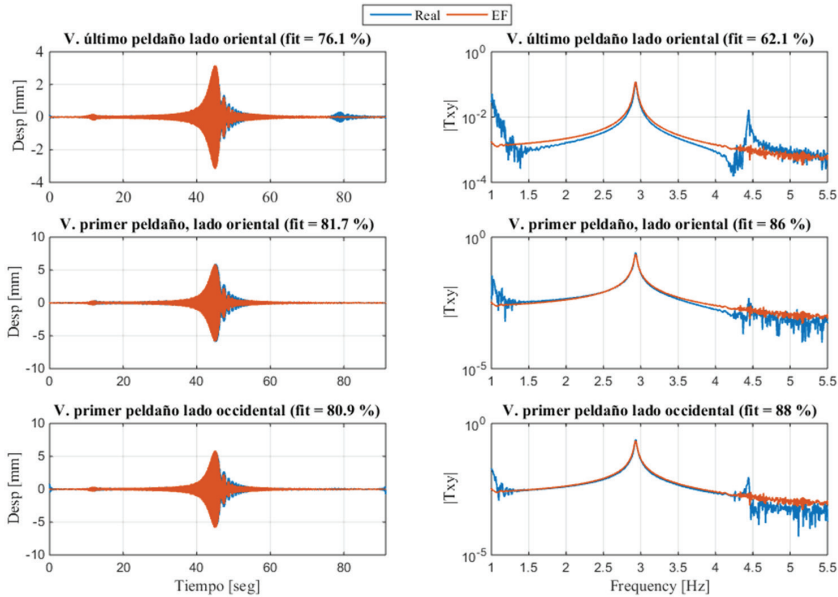
Con el fin de representar la estructura metálica tipo tribuna se construyó un modelo en EF mediante el software SAP2000. Se realizó un ajuste del modelo usando algoritmos de optimización en Matlab y el API que permite tener interacción con SAP2000. Se varió el módulo de elasticidad del acero de las dos columnas en forma de V hasta obtener el mejor ajuste de la frecuencia fundamental de la estructura metálica tipo tribuna real. El modelo en EF de la estructura se puede observar en la Figura 5.



**Figura 5.** Modelo en EF de la estructura metálica tipo tribuna.

La efectividad del modelo en EF se comprobó mediante el ajuste de la respuesta en el dominio del tiempo y de las FT usando la (Ec.1) con respecto a los registros experimentales, como se observa en la : donde  $y_i$  representa el desplazamiento en el dominio del tiempo y  $\hat{y}_i$  la norma de ese desplazamiento. Se puede observar que el modelo en EF se actualizó solo para la frecuencia fundamental ya que es la frecuencia que tiene mayor incidencia en la representación del sistema.

$$fit_i = \left(1 - \frac{\|y_i - \hat{y}_i\|}{\|y_i - promedio(y_i)\|}\right) \tag{Ec.1}$$



**Figura 6.** Ajuste del modelo en EF.

En función de las propiedades dinámicas encontradas, se desarrolló un modelo reducido en espacios de estados (EE) de la estructura utilizando Simulink [11]. Se realizó una simulación del modelo en tiempo discreto sometido a la misma fuerza de excitación impuesta en el primer peldaño del modelo en EF de

la estructura metálica tipo tribuna. La efectividad del modelo en EE se comprobó mediante el ajuste de la respuesta en el dominio del tiempo y de las funciones de transferencia (Ec.1) con respecto a los registros experimentales, como se observa en la Figura 7.

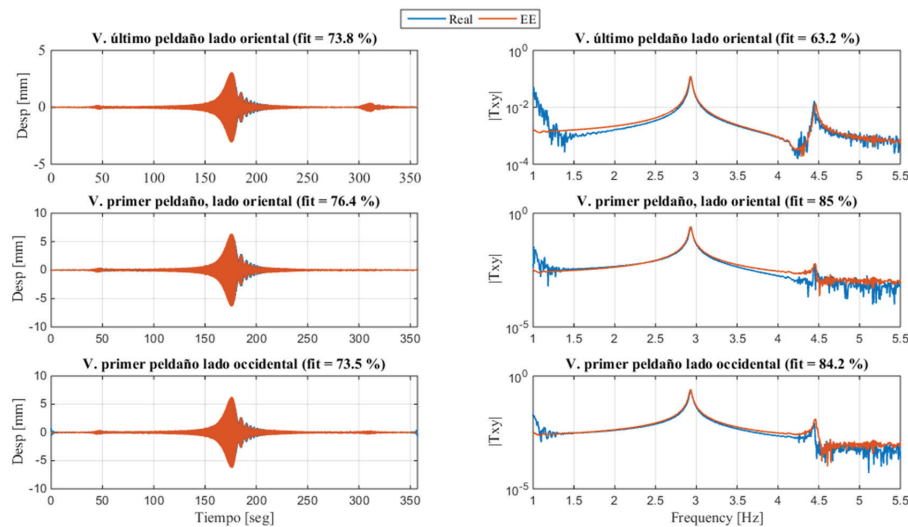
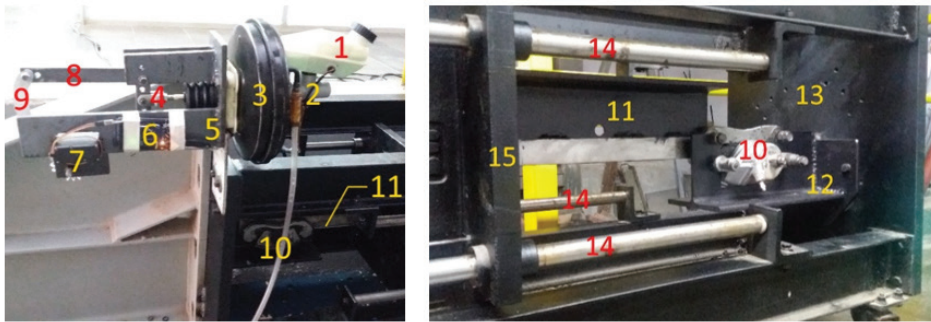


Figura 7. Ajuste del modelo en EE.

## Componentes físicos

El componente físico de esta RTHS corresponde a un AFS en escala real tal como muestra la Figura 8. El AFS reduce la respuesta dinámica de la estructura aplicando una fuerza que se opone a su desplazamiento. Para evaluar el AFS, la transferencia entre los componentes simulados y físicos se realizó mediante el montaje experimental de RTHS (ver Figura 9), el cual consiste en una estructura de acero que soporta un actuador servo-hidráulico Shore Western 913D y dos placas de reacción. Entre el vástago del actuador servo-hidráulico

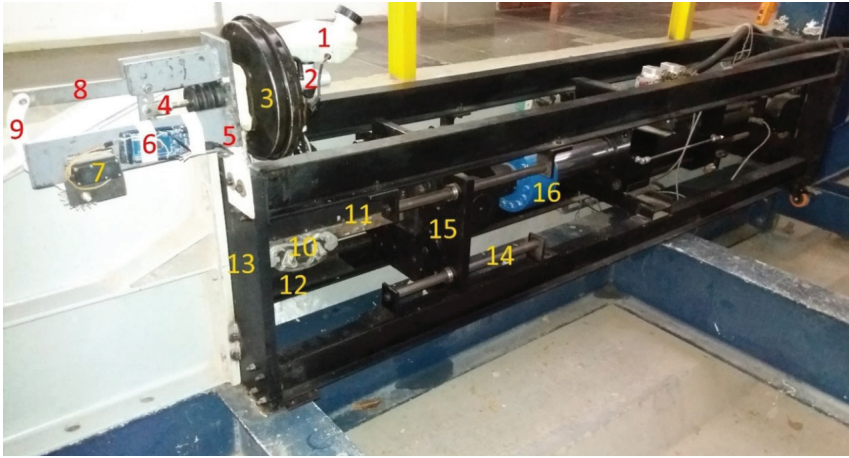
y una placa de reacción se incorpora el AFS. La retroalimentación entre los componentes físicos y simulados se realizó determinando la fuerza inducida por la fricción generada por el AFS, mediante una celda de carga Interface 1032ACK. Un perfil de acero representa la ubicación del AFS en la estructura y se desplaza junto con el vástago del actuador servo-hidráulico, mientras que el AFS permanece fijo, conectado a una placa de reacción. El funcionamiento del AFS se describe a continuación, según la numeración de la Figura 9.



**Figura 8.** Amortiguador de fricción semiactivo (AFS) en escala real.

La fuerza de fricción producida por el AFS se genera entre un freno hidráulico (10) y un perfil de acero (11), que representa el elemento de la estructura donde se ubique el AFS. El elemento del freno que entra en contacto con el perfil estructural, generando una fuerza de fricción, son las pastillas de freno, las cuales ejercen la presión transmitida por los pistones hidráulicos del freno. La presión normal de los pistones hidráulicos depende del sistema accionador y se transmite con la bomba de frenado (2), a través del líquido de frenos que se conduce por las mangueras hidráulicas y se almacena en el depósito de líquido de frenos (1). La bomba de frenado transmite la presión mecánica

generada por el movimiento del vástago (4). La presión mecánica aplicada por el vástago se amplifica con el *hidrovac* o *booster* (3), el cual suaviza el frenado para que el sistema accionador sea más eficaz. El movimiento del vástago depende del giro de un servomotor (7) controlado con señales digitales. Este giro se transmite a la palanca de frenado (8) a través de un elemento conector (9), y mediante una relación de palancas se genera el movimiento. Las señales digitales son enviadas por el controlador (6), una tarjeta Arduino Mega 2560. El sistema accionador se instala en el montaje del actuador servo-hidráulico a través del soporte del sistema accionador (5).



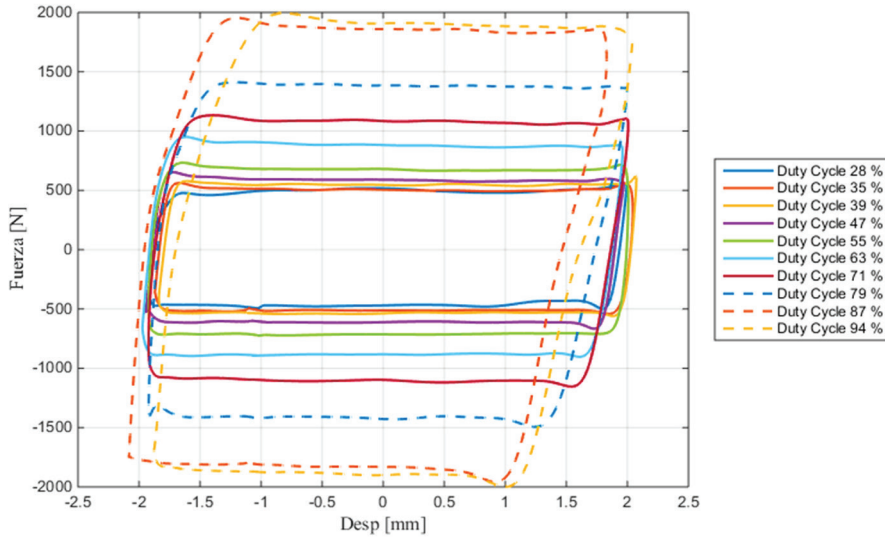
**Figura 9.** AFS en escala real sobre montaje de RTHS.

Para representar el funcionamiento del AFS como dispositivo de control en una estructura real, se instaló el freno en un soporte (12) conectado a la placa de reacción del montaje del actuador servo-hidráulico (13). El desplazamiento de la estructura en el piso donde se ubique el AFS se replica a través del movimiento de la placa estructural (15) que conecta el vástago del actuador servo-hidráulico con el perfil estructural (11). El movimiento es unidireccional y se restringe según los rieles guía (14).

En un ensayo de RTHS, mientras el actuador servo-hidráulico está replicando el desplazamiento del primer peldaño de la tribuna sometida a una excitación vertical, se registra la aceleración utilizando un acelerómetro ubicado en la placa estructural (15). Si la aceleración sobrepasa un umbral

determinado por la estrategia de control, el controlador (6) determina la señal digital que representa el estado de frenado necesario para reducir las vibraciones excesivas, activando el AFS y generando la fuerza de fricción que se mide a través de una celda de carga (16).

Para determinar la fuerza de fricción en los diferentes estados de frenado del AFS, mediante el controlador, se posicionó el servomotor en un ángulo fijo para diferentes ciclos de trabajo (*duty cycle*). Mientras el actuador servo-hidráulico estuvo en movimiento, la celda de carga registró la fuerza generada por el AFS. Para cada estado de frenado se obtuvo un ciclo de histéresis, como se muestra en la Figura 10. Se determinó que el dispositivo puede generar una fuerza máxima cercana a 2000 N.



**Figura 10.** Ciclos de histéresis asociados a cada estado de frenado.

## Estrategia de control semiactivo

La eficiencia de los sistemas de control estructural semiactivos varía radicalmente dependiendo de la estrategia de control utilizada [12]. Muchas de las estrategias de control implementadas en amortiguadores semiactivos de fricción son descentralizadas. Una de las principales ventajas del control descentralizado es

que la falla de uno de los sistemas no provoca la falla del sistema completo [13]. El funcionamiento del sistema de fricción considera dos fases: la primera es cuando existe movimiento relativo entre el amortiguador y la placa de acero (el amortiguador está en fase de deslizamiento y la fuerza de fricción cinemática disipa la energía); pero cuando la fuerza normal es demasiado alta, el sistema está en fase de bloqueo y no hay disipación de energía por fricción [14, 15].

Han sido desarrolladas muchas estrategias de control que pueden ser implementadas en amortiguadores de fricción variable. Algunas estrategias de control se basan en variar la rigidez del sistema [16, 17]; otras buscan mantener el amortiguador en fase de deslizamiento tanto tiempo como sea posible [15, 18, 19], como la estrategia *sliding mode* [14, 15] propuesta por Utkin [20] que, aunque su algoritmo es simple, ha demostrado ser eficaz en la reducción de la respuesta sísmica de estructuras [21].

En este trabajo se implementó la estrategia *sliding mode* para el AFS como en el trabajo de Mantilla *et al.* [22]. En la estrategia *sliding mode* se usa como entrada la respuesta en desplazamiento o aceleración entre pisos consecutivos. La estrategia consiste en almacenar información de la respuesta durante un periodo determinado, llamado tiempo de decisión ( $T_d$ ). Al final de este periodo, el valor pico ( $P_v$ ) de la respuesta estructural es comparado con un umbral de respuesta admisible ( $A_0$ ). Si  $P_v$  es mayor que  $A_0$ , el sistema está en la fase de deslizamiento e indica que el sistema es capaz de disipar más energía y, por ende, la fuerza de sujeción es aumentada un valor  $\Delta N$ . Por lo contrario, si  $P_v$  es menor que  $A_0$ , el sistema está bloqueado y la

fuerza de sujeción debe ser reducida un  $\Delta N$ .

$$N = \begin{cases} N + \Delta N, & \text{si } P_v \geq A_0 \\ N - \Delta N, & \text{si } P_v < A_0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 1})$$

Considerando que existe una mayor dificultad asociada a la adecuada medición de desplazamientos ( $x$ ) y velocidades ( $\dot{x}$ ) directamente en la estructura, en especial durante actividad sísmica [9], se optó por implementar el algoritmo de la (Ec. 1) utilizando las aceleraciones verticales relativas ( $\ddot{x}$ ) del modelo numérico de la estructura. Las constantes de la estrategia de control *sliding mode* utilizadas fueron: tiempo de decisión  $T_d = 0.01$  s; umbral de respuesta admisible  $A_0 = 0.1$ ; gravedades y  $\Delta N = 10$ .

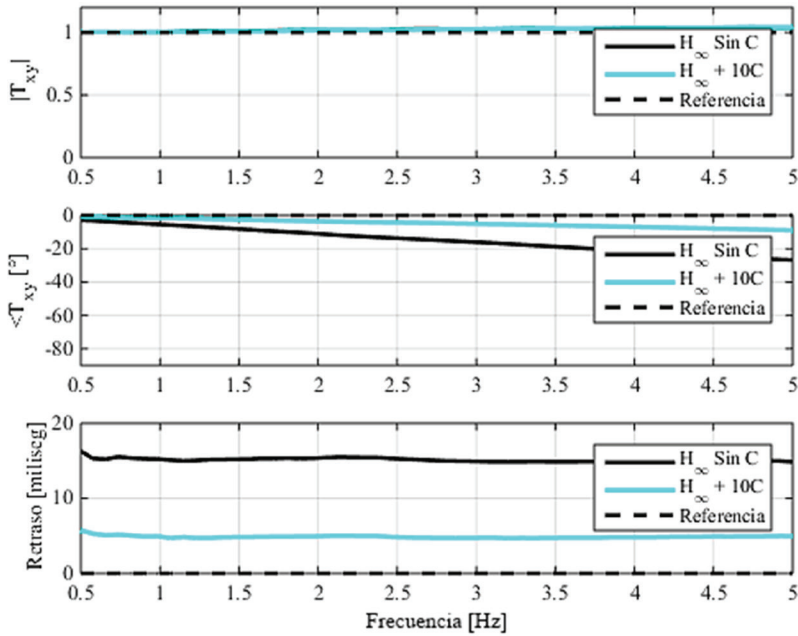
## Rendimiento de la simulación híbrida en tiempo real

Generalmente, el mecanismo de transferencia entre los componentes físicos y simulados es un actuador hidráulico, el cual debe ser controlado de manera óptima para disminuir el tiempo de retraso entre el desplazamiento deseado y el realizado por parte del actuador [9]. Horiuchi *et al.* [23] demostraron que el aumento de

la energía total causado por el retraso es equivalente a la introducción de amortiguamiento negativo en el sistema. Este amortiguamiento negativo artificial se hace grande cuando la rigidez del sistema o el tiempo de retraso son grandes. Cuando este amortiguamiento negativo es mayor que el amortiguamiento estructural, la respuesta será inestable y el experimento debe detenerse [24].

En este estudio se diseñó una estrategia  $H_\infty$  para controlar el sistemas estructurales físicos que se pueden ensayar en el montaje de RTHS.

movimiento del actuador servo-hidráulico y mejorar el seguimiento entre los desplazamientos deseados y los realizados. Se propone este controlador ya que proporciona una estabilidad robusta en un sistema de control de retroalimentación cuando se producen grandes incertidumbres del sistema y/o errores de identificación [25]. Se buscó reducir los errores por ruido en los sensores, disturbios de entrada y las diferentes configuraciones experimentales de



**Figura 11.** Funciones de transferencia del seguimiento del actuador servo-hidráulico.

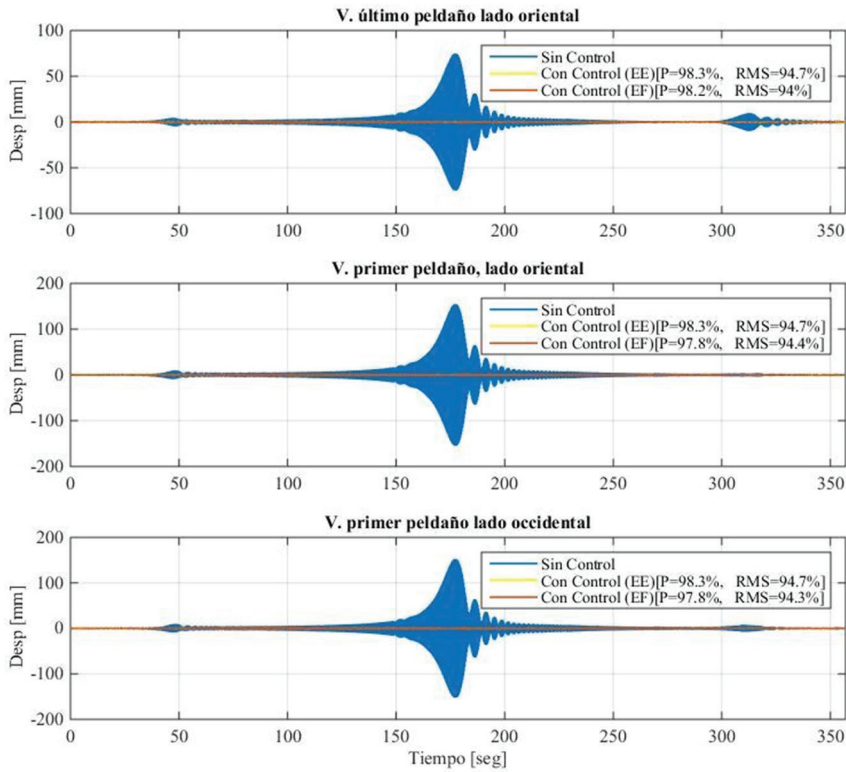
En la Figura 11 se observa la función de transferencia del seguimiento del actuador servo-hidráulico, para un barrido sinusoidal entre 0.5 y 5 Hz durante 60 s de adquisición de datos, donde  $|T_{xy}|$  y  $\angle T_{xy}$  son la magnitud y el ángulo de fase. Se obtuvo un retraso de 15 ms entre la señal de referencia y el seguimiento del actuador servo-hidráulico implementando el controlador  $H_{\infty}$ . Para mejorar el rendimiento del actuador, se implementó un compensador de retardo de extrapolación polinomial (C) como en el trabajo de Horiuchi *et al.* [23], el cual predice el desplazamiento del actuador después del retardo entre el desplazamiento mandado y la realización del comando de mando por parte del actuador. Se obtuvo un retraso de 5 ms entre la señal de referencia y el seguimiento del actuador servo-hidráulico implementando el controlador  $H_{\infty}$  y 10 compensadores de primer orden.

## Resultados de la simulación híbrida en tiempo real

Los resultados del ensayo de SHTR de la estructura metálica tipo tribuna implementando el AFS en el primer y último peldaño se compararon con la respuesta de la estructura sin control. La señal de la fuerza actuante usada para el ensayo fue el barrido lineal de frecuencias entre 0.5 y 5 Hz mostrado en la Figura 4, escalado 25 veces y aplicado en sentido vertical sobre el primer peldaño de la estructura. Se determinaron las reducciones del desplazamiento pico P (Ec. 3) y la media cuadrática RMS (Ec. 4) de la estructura con control en espacio de estados (EE) y en elementos finitos (EF), con respecto a la estructura sin control, como se puede observar en la Figura 12.

$$P = \left(1 - \frac{|\max(x_{con control})|}{|\max(x_{sin control})|}\right) * 100 \quad (Ec. 3)$$

$$RMS = \left(1 - \frac{RMS(x_{con control})}{RMS(x_{sin control})}\right) * 100 \quad (Ec. 4)$$



**Figura 12.** Comparación de respuestas para la fuerza de excitación en el primer peldaño.

La Tabla 10 presenta un resumen de los porcentajes de reducción de los desplazamientos P y RMS de cada ubicación del sensor en la estructura

con control semiactivo obtenidos en la SHTR para los modelos en EE y EF con respecto a la estructura sin control bajo la fuerza de excitación.

**Tabla 10.** Reducción de los desplazamientos P y RMS, bajo la fuerza de excitación.

| Sensor | Desplazamientos Pico |        | Desplazamientos RMS |        |
|--------|----------------------|--------|---------------------|--------|
|        | EE [%]               | EF [%] | EE [%]              | EF [%] |
| 1      | 98.3                 | 98.2   | 94.7                | 94.0   |
| 2      | 98.3                 | 97.8   | 94.7                | 94.4   |
| 3      | 98.3                 | 97.8   | 94.7                | 94.3   |
|        | 98.3                 | 97.9   | 94.7                | 94.2   |

## Conclusiones

Mediante los ensayos de RTHS se validó experimentalmente el desempeño del AFS en escala real, implementado como dispositivo para la reducción de la respuesta de estructuras sometidas a excitaciones verticales. En la RTHS con la estructura metálica tipo tribuna el AFS logró reducciones de los desplazamientos Pico y RMS de 98.2 % y 94.6 %, respectivamente, en el primer peldaño.

Mediante la implementación del compensador se logró reducir el retraso inicial del actuador servo-hidráulico de 15 ms a 5 ms, mejorando el seguimiento de la señal de referencia.

La RTHS proporciona un medio práctico y rentable para estimar

el comportamiento de sistemas estructurales en escala real controlados con dispositivos de disipación de energía adicionales, incluso cuando estos dispositivos presentan comportamientos no lineales.

## Agradecimientos

El grupo de investigación G-7 agradece a la Universidad del Valle y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) de Colombia por la financiación del proyecto “Desarrollo de Sistemas de Control Estructural Semiactivo de Bajo Costo”, identificado con el código 1106-569-34424.

## Referencias

- [1] T. E. Saaed, G. Nikolakopoulos, J. E. Jonasson y H. Hedlund, "A state-of-the-art review of structural control systems", *Journal of Vibration and Control*, vol. 21, pp. 919-937, 2015.
- [2] T. T. Soong y J. B. F. Spencer, "Active, Semi-Active And Hybrid Control Of Structures", in *12th World conference on earthquake engineering*, Auckland, New Zeland, 2000.
- [3] G. W. Housner, L. A. Bergman, T. K. Caughey, *et al.* "Structural Control: Past, Present, And Future", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, n° 9, pp. 897-971, 1997.
- [4] M. D. Symans y M. C. Constantinou, "Semi-Active Control Systems for Seismic Protection of Structures: a State-of-the-Art-Review", *Engineering Structures*, vol. 21, n° 6 pp. 469-487, 1997.
- [5] A. Friedman y S. Dyke, "Development and Experimental Validation of a New Control Strategy Considering Device Dynamics for Large-Scale MR Dampers using Real-Time Hybrid Simulation", *Intelligent Infrastructure Systems Laboratory*, 2013.
- [6] J. S. Mantilla, D. Gómez y P. Thomson, "Structural Control Using a Semiactive Friction Damper", *IMAC-XXXIV, Dynamics of Multi-physical Systems: From Active Materials to Vibroacoustics*, 2016.
- [7] W. L. He, A. K. Agrawal y J. N. Yang, "Novel Semiactive Friction Controller for Linear Structures against Earthquakes", *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, pp. 941-950, 2003.
- [8] F. Zhu, J.-T. Wang, F. Jin *et al.* "Real-time hybrid simulation of full-scale tuned liquid column dampers to control multi-order modal responses of structures", *Engineering Structures*, vol. 138, pp. 74-90, 2017.
- [9] S. J. Dyke, B. F. Spencer, P. Quast *et al.*, "Role of control-structure interaction in protective system design", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, vol. 121, n° 2, pp. 322-338, 1995.
- [10] Y. Z. Lin y R. E. Christenson, "Comparison of Real-Time Hybrid Testing with Shake Table Tests for an MR Damper Controlled Structure", *American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront*, St. Louis, MO, USA, 2009.
- [11] Mathworks, MATLAB. The Mathworks, Inc. [Online], 1994. Disponible en: <http://www.mathworks.com>. [consultado en dic. 6 2014].

- [12] S. K. Yalla, *Liquid dampers for mitigation of structural response: theoretical development and experimental validation*, tesis PhD, University of Notre Dame, 2001.
- [13] C.-H. Loh, J. P. Lynch, K.-C. Lu, *et al.*, “Experimental verification of a wireless sensing and control system for structural control using MR dampers”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 36, n° 10, pp. 1303-1328, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.682>
- [14] Y. L. Xu, W. L. Qu y Z. H. Chen, “Control of wind-excited truss tower using semiactive friction damper”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 127, n° 8, pp. 861-868, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:8\(861\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:8(861))
- [15] J. N. Yang, J. C. Wu y Z. Li, “Control of seismic-excited buildings using active variable stiffness systems”, *Engineering and Structures*, vol. 18, n° 8, pp. 589-596, 1996.
- [16] A. K. Agrawal, J. N. Yang y W. L. He, “Applications of some semiactive control systems to benchmark cable-stayed bridge”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, pp. 884-894, 2003.
- [17] T. Kobori y S. Kamagata, “Active variable stiffness system - Active seismic response control”, *Symposium on Structural Control and Intelligent Systems*, pp. 140-153, 1992.
- [18] Z. Akbay y H. M. Aktan, “Intelligent energy dissipation devices”, en *Proc., 4th U.S. Nat. Conf. on Earthquake Engrg.*, EERI, California, 1990.
- [19] A. S. Pall y C. Marsh, “Response of Friction Damped Braced Frames”, *Journal of the Structural Division*, vol. 108, pp. 1-13, 1982.
- [20] V. Utkin, “Sliding Modes and their Applications in Variable Structure Systems”, en *Nonlinear and Optimal Control Theory*, Berlin: Springer, 1978, pp. 289-347.
- [21] A. Nishitami, Y. Nitta, A. Itoh, *et al.*, “Semiactive variable-friction damper control with simple algorithm”, en *American Control Conference*, Chicago, Illinois, 2000.
- [22] J. S. Mantilla, A. Solarte, D. Gomez, *et al.*, “Semi-Active Friction Damper for Buildings Subject to Seismic Excitation”, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 97991H, 15 abr. 2016.
- [23] T. Horiuchi, M. Nakagawa, M. Sugano *et al.*, “Development of a Real-Time Hybrid Experimental System with Actuator Delay Compensation”, en *Proceedings 11th World*

- Conf. on Earthquake Engineerin. Aca-*  
*pulco, México, 1996.*
- [24] A. Darby, “Real-time substructure tests using hydraulic actuator”, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 125, n° 10, pp. 1133-1139, 1999.
- [25] X. Gao, N. Castaneda y S. Dyke, “Real time hybrid simulation: From dynamic system, motion control to experimental error”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 42, n° 6, pp. 815-832, 2013.



---

# **Aplicación de la simulación de Montecarlo a la evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en roca**

## **Application of the Montecarlo Simulation to the Probabilistic Assessment of the Stability of Slopes on Rock**

---

**Rubén Medinaceli Tórrez**

Magister, Universidad Técnica de Oruro  
r.medinaceli.torrez@gmail.com

**Resumen:** en el presente trabajo, a través de una metodología probabilística, la simulación de Montecarlo, se evalúa la estabilidad de un talud en roca en el que la modalidad previsible de fallamiento es la falla en cuña. Se evalúa la estabilidad del talud seleccionado utilizando el diseño determinístico de taludes. Además, se calcula el factor de seguridad de dicho talud. Posteriormente se desarrolla una metodología para el diseño probabilístico del talud considerado en el caso de estudio. Para el efecto se sigue paso a paso el método recomendado por la simulación de Montecarlo para la solución de problemas. Los resultados obtenidos permiten validar inicialmente el modelo de simulación. La simplicidad conceptual de la simulación de Montecarlo, junto con la tecnología informática disponible en la actualidad, ha incrementado notablemente la popularidad de esta metodología. Por tanto, los ingenieros bolivianos, particularmente los ingenieros de minas, civiles y geotécnicos tienen a la mano una herramienta conceptualmente simple para mejorar sus diseños.

**Palabras clave:** estabilidad; Montecarlo; roca; simulación; taludes.

**Abstract:** In this work, through a probabilistic methodology, the Montecarlo simulation, the stability of a rock slope in which the foreseeable failure mode is the wedge fault is evaluated. The stability of the selected slope is evaluated using deterministic slope design, the safety factor of the slope is calculated. Subsequently, a methodology for the probabilistic design of the slope considered in the case study is developed. For this purpose, the method recommended by the Montecarlo simulation for problem solving is followed step by step. Finally, the simulation experiments are carried out with the simulation model built. The results obtained allow the initial validation of the simulation model.

The conceptual simplicity of the Montecarlo simulation, together with the computer technology available nowadays, has significantly increased the popularity of this methodology. Therefore, Bolivian engineers, particularly mining, civil, and geotechnical have at hand a conceptually simple tool to improve their designs.

**Keywords:** Stability; Montecarlo; rock; simulation; slopes.

## Introducción

En una disciplina como la geotecnia, en la que la incertidumbre juega un papel importante, el ingeniero está obligado a buscar soluciones viables y confiables. Uno de los aspectos clave en el ámbito de la ingeniería de taludes es la evaluación de la estabilidad de un talud. En la mayor parte de los casos, esta evaluación se basa exclusivamente en la experiencia y la capacidad de cálculo del ingeniero encargado. Sin embargo, este tipo de evaluación puede llevar a diseños poco confiables. Frente a esto, el uso de técnicas de naturaleza probabilística en el diseño geotécnico resulta adecuado para la gestión de la incertidumbre y la estimación del riesgo asociado a un diseño.

Una de dichas técnicas es la simulación de Montecarlo. En esta técnica, algunas variables de entrada del diseño determinístico son aleatorias con cierto comportamiento probabilístico (función de densidad de probabilidad). Se generan valores aleatorios para cada una de estas variables y se introducen estos valores en el modelo determinístico que consiste en una ecuación o un conjunto de ecuaciones, lo que genera varios valores para la variable de salida, generalmente, el factor de seguridad. Estos valores permiten asignar, por ejemplo, probabilidades de falla a un determinado diseño.

Los ingenieros encargados de desarrollar la ingeniería de taludes saben que las propiedades geológicas de la roca varían de una ubicación a otra y que también pueden cambiar con el tiempo; en otras palabras, los datos obtenidos en cierto lugar no aseguran la información en otro lugar. De igual manera, ellos conocen que la cuantificación de las propiedades mecánicas de la roca, particularmente la resistencia de la roca al corte, está basada en los resultados de pruebas de laboratorio. En estas pruebas difícilmente pueden reproducirse las condiciones reales del terreno por una serie de factores que tienen que ver con el número de pruebas realizadas, los errores cometidos durante el muestro, las perturbaciones durante las pruebas de laboratorio, el procesamiento de los datos obtenidos en el laboratorio y otros.

En atención a dicha preocupación se han desarrollado varios métodos probabilísticos para asociar, a los factores de seguridad de un método determinístico, niveles de confiabilidad en términos de probabilidad. La simulación de Montecarlo ha ganado popularidad debido a su simplicidad conceptual: este método crea modelos probabilísticos, a partir de datos de campo para las variables con mayor incertidumbre asociada (por ejemplo, el ángulo de fricción o la cohesión).

Utiliza estos modelos para generar altas cantidades de valores del factor de seguridad correspondientes a valores críticos de los parámetros decisivos (buzamiento de la cara del talud, altura del talud, presencia de agua y otros) en la estabilidad de un talud. Posteriormente, estima la probabilidad de falla del talud.

En este orden de ideas, se decidió estudiar la estabilidad del talud de la zona sud de la ciudad de Oruro (serranías de Oruro entre las calles Washington y Camacho).

caso de estudio. Tal como se dijo anteriormente, el talud considerado se encuentra en la zona sud de la ciudad de Oruro (“Cerros de Oruro”, calles Camacho y Tomás Frías) (véase Figura 1).



**Figura 1.** Talud del caso de estudio.

## Desarrollo

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la estabilidad de un talud en roca en el que se prevé una falla en cuña y, así, complementar el método determinístico utilizado actualmente con un análisis probabilístico de la estabilidad del talud, recurriendo a la simulación de Montecarlo.

### Diseño determinístico del talud: caso de estudio

Se efectuó el diseño determinístico del talud relacionado con el

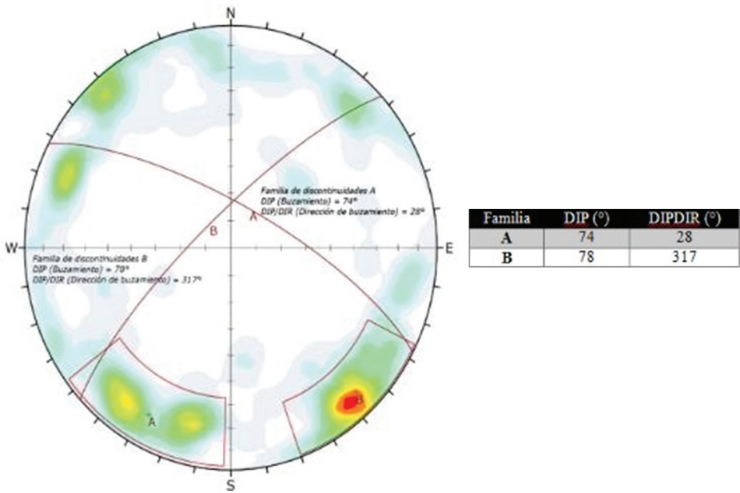
Para fines de diseño del talud, se efectuó un mapeo geológico estructural en la zona del talud. Se midieron los buzamientos y las direcciones de buzamiento de varias discontinuidades (diaclasas) existentes en el lugar del talud. Se obtuvieron buzamientos y direcciones de buzamiento de 112 discontinuidades. También se midieron el buzamiento y la dirección del buzamiento de la cara dominante y superficie superior del talud, datos importantes para el diseño del talud. La Tabla 1 muestra los datos obtenidos.

**Tabla 1.** Datos generales del talud, buzamientos y direcciones de buzamiento de discontinuidades en la zona del talud.

| No. | DIP | DIP<br>DIR | No. | DIP | DIP<br>DIR | No. | DIP | DIP<br>DIR | No. | DIP | DIP<br>DIR | No. | DIP | DIP<br>DIR | No. | DIP | DIP<br>DIR |
|-----|-----|------------|-----|-----|------------|-----|-----|------------|-----|-----|------------|-----|-----|------------|-----|-----|------------|
| 1   | 69  | 105        | 21  | 77  | 15         | 41  | 51  | 178        | 61  | 81  | 325        | 81  | 77  | 35         | 101 | 73  | 190        |
| 2   | 47  | 355        | 22  | 84  | 20         | 42  | 75  | 140        | 62  | 36  | 230        | 82  | 58  | 255        | 102 | 74  | 50         |
| 3   | 83  | 304        | 23  | 72  | 155        | 43  | 84  | 220        | 63  | 80  | 316        | 83  | 86  | 60         | 103 | 70  | 330        |
| 4   | 83  | 97         | 24  | 69  | 14         | 44  | 70  | 125        | 64  | 81  | 170        | 84  | 74  | 220        | 104 | 81  | 280        |
| 5   | 86  | 330        | 25  | 66  | 7          | 45  | 74  | 228        | 65  | 84  | 325        | 85  | 72  | 310        | 105 | 74  | 280        |
| 6   | 79  | 115        | 26  | 70  | 180        | 46  | 89  | 155        | 66  | 84  | 315        | 86  | 75  | 40         | 106 | 62  | 345        |
| 7   | 70  | 18         | 27  | 74  | 18         | 47  | 76  | 225        | 67  | 86  | 137        | 87  | 65  | 10         | 107 | 85  | 68         |
| 8   | 85  | 135        | 28  | 85  | 174        | 48  | 85  | 338        | 68  | 82  | 320        | 88  | 67  | 310        | 108 | 58  | 330        |
| 9   | 82  | 15         | 29  | 35  | 230        | 49  | 86  | 312        | 69  | 60  | 145        | 89  | 64  | 310        | 109 | 80  | 60         |
| 10  | 65  | 195        | 30  | 39  | 350        | 50  | 54  | 15         | 70  | 66  | 295        | 90  | 84  | 44         | 110 | 65  | 60         |
| 11  | 80  | 210        | 31  | 57  | 77         | 51  | 89  | 345        | 71  | 66  | 40         | 91  | 70  | 220        | 111 | 67  | 128        |
| 12  | 70  | 85         | 32  | 79  | 140        | 52  | 85  | 150        | 72  | 78  | 300        | 92  | 74  | 320        | 112 | 85  | 232        |
| 13  | 74  | 110        | 33  | 74  | 138        | 53  | 85  | 270        | 73  | 84  | 300        | 93  | 70  | 50         |     |     |            |
| 14  | 75  | 280        | 34  | 40  | 205        | 54  | 76  | 35         | 74  | 82  | 35         | 94  | 76  | 100        |     |     |            |
| 15  | 74  | 115        | 35  | 54  | 320        | 55  | 76  | 175        | 75  | 84  | 85         | 95  | 70  | 40         |     |     |            |
| 16  | 77  | 112        | 36  | 80  | 30         | 56  | 30  | 65         | 76  | 70  | 320        | 96  | 66  | 25         |     |     |            |
| 17  | 70  | 290        | 37  | 75  | 202        | 57  | 63  | 235        | 77  | 74  | 115        | 97  | 65  | 175        |     |     |            |
| 18  | 67  | 10         | 38  | 76  | 320        | 58  | 84  | 140        | 78  | 85  | 30         | 98  | 75  | 355        |     |     |            |
| 19  | 56  | 275        | 39  | 85  | 320        | 59  | 55  | 52         | 79  | 85  | 240        | 99  | 72  | 325        |     |     |            |
| 20  | 73  | 300        | 40  | 69  | 35         | 60  | 50  | 70         | 80  | 84  | 75         | 100 | 50  | 160        |     |     |            |

|                               | DIP(°) | DIPDIR(°) |
|-------------------------------|--------|-----------|
| Cara del talud                | 73     | 8         |
| Superficie superior del talud | 25     | 15        |
| Altura del talud (m)          | 20     |           |

La Figura 2 muestra los grandes círculos de las dos mayores concentraciones de polo. También presenta el buzamiento (DIP) y la dirección de buzamiento (DIPDIR) de las dos principales familias de discontinuidades. El gráfico se obtuvo con el *software* DIPS.



**Figura 2.** Grandes círculos de las dos principales familias de discontinuidades

Para la obtención de la cohesión y el ángulo de fricción interna de la roca del lugar del talud se realizaron ensayos de corte directo en los cuerpos de prueba.

En el diseño determinístico del talud se utilizaron los valores promedio de los valores de ángulo de fricción interna y de cohesión, obtenidos en los ensayos de corte directo: ángulo de fricción interna: 39°; cohesión: 38 kPa; y peso específico de la roca: 20 kN/m<sup>3</sup>

Las diferentes modalidades de falla en taludes en roca están asociadas con las estructuras geológicas. Es importante que el ingeniero de taludes pueda identificar la potencial modalidad de fallamiento durante las primeras etapas de un proyecto. La Figura 3 muestra los cuatro tipos de falla y el típico ploteo de polos de condiciones geológicas que pueden

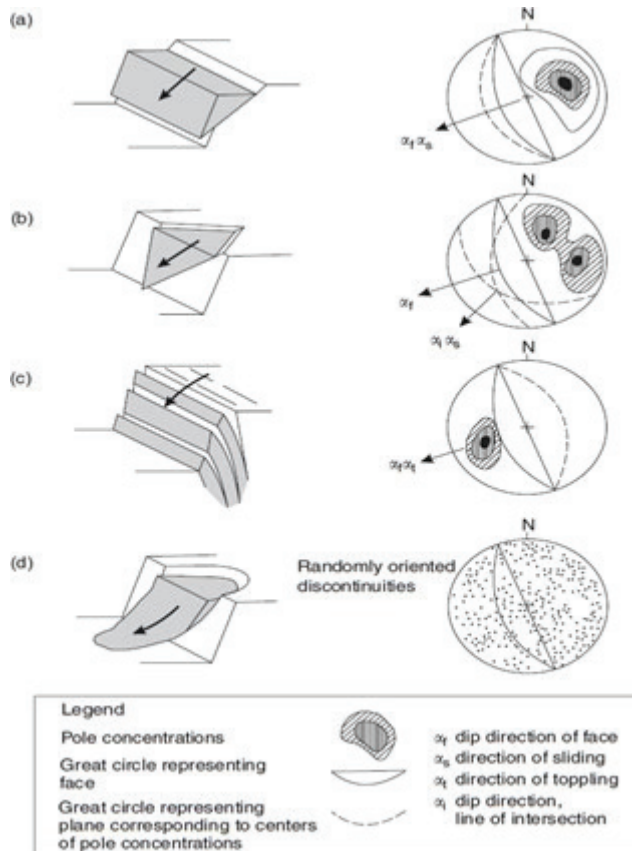
conducir a tales fallas. Es importante tener en cuenta que, al evaluar la estabilidad, debe incluirse en la estereoneta la cara del talud, ya que el deslizamiento solo puede ocurrir como resultado del movimiento hacia la cara libre creada por el corte. Hay una ecuación o sistema de ecuaciones diferente para cada modalidad de fallamiento, por lo que es importante utilizar la ecuación o sistema de ecuaciones correcto en el diseño.

Los diagramas de la Figura 3 han sido simplificados para que sean más claros. En un talud de roca real, puede haber varios tipos de estructuras geológicas, lo que da lugar a más tipos de fallas. En la figura superior, el caso (a) representa una falla plana; el caso (b) representa una falla en cuña por la intersección de dos discontinuidades;

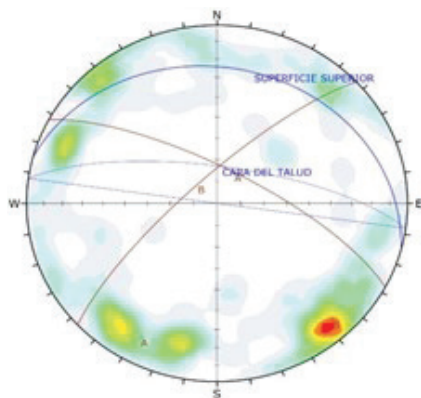
el caso (c) es una falla por volteo; y el caso (d) representa una falla circular.

Tomando en cuenta los valores de buzamiento y dirección de buzamiento de la cara del talud y de la superficie superior del talud (ver Tabla 1), los valores de buzamiento y dirección de buzamiento de las dos familias principales de discontinuidades

(Figura 2) se han representado en una estereoneta. Los grandes círculos corresponden a la cara del talud, la superficie superior del talud y las dos familias principales de discontinuidades, con la finalidad de predecir la posible modalidad de fallamiento. Esta estereoneta se muestra en la Figura 4.



**Figura 3.** Principales tipos de fallas en taludes y condiciones de geología estructural que pueden causar estas fallas. Tomado de [1].



**Figura 4.** Estereoneta para la predicción de la modalidad de falla.

Comparando las cuatro modalidades de falla descritas en la Figura 3 con la estereoneta lograda en la Figura 4, es posible identificar la potencial modalidad de fallamiento.

En resumen, vale decir que,  $\psi_i = 72^\circ$  es el valor del buzamiento de la cara del talud; ( $\psi_{fi}$ ) ha sido medido en el terreno, el valor se encuentra en la Tabla I.

Esto es,

$$\psi_{fi} = 73^\circ$$

$$FS = \frac{3}{\gamma_r H_c} (c_A X + c_B Y) + \left( A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} X \right) \tan \phi_A + \left( B - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} Y \right) \tan \phi_B$$

$$FS = \frac{3}{20 \times 20,211} (38 \times 1,2565 + 38 \times 14,3007) + \left( 0,2407 - \frac{9,81}{2 \times 20} \times 1,2565 \right) \tan 39^\circ + \left( 0,1207 - \frac{9,81}{2 \times 20} \times 14,3007 \right) \tan 39^\circ$$

$$FS = 1,6$$

El valor del ángulo de fricción interna ha sido obtenido mediante ensayos de corte directo, el promedio de este valor es:

$$\phi = 39^\circ$$

A continuación, se verifica el cumplimiento de condiciones para una falla en cuña,

$$\psi_{fi} > \psi_i > \phi$$

$$73^\circ > 72^\circ > 39^\circ$$

Como se observa, la condición geométrica se cumple. Esto significa que en el talud la modalidad potencial de fallamiento es la falla en cuña.

Una vez realizada la predicción de la potencial modalidad de falla (falla en cuña) en el talud, en el marco del diseño determinístico, se procedió a calcular el factor de seguridad del talud.

El valor obtenido para el factor de seguridad (mayor a 1) permite afirmar que el talud en estudio es estable. Sin embargo, en este caso y en otros, queda la duda sobre la estabilidad del talud, ya existe una incertidumbre asociada a variables como la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso específico de la roca del talud. Precisamente, el diseño probabilístico de un talud en roca, permite medir la incertidumbre asociada a las variables mencionadas en términos de la probabilidad de falla.

### **Diseño probabilístico de taludes en roca utilizando la simulación de Montecarlo: caso de estudio**

Tal como se señaló anteriormente, la evaluación probabilística de la estabilidad de un talud en roca ha evolucionado en los últimos años. Aun así, el diseño determinístico basado en un factor de seguridad sigue siendo ampliamente utilizado en el diseño de estructuras geotécnicas como en muros de contención, fundaciones, túneles, taludes, etc.

Las propiedades geológicas y, sobre todo, las propiedades mecánicas de la roca varían de una ubicación a otra y pueden cambiar con el tiempo. Su cuantificación está basada en los resultados de pruebas de laboratorio, pruebas en las que difícilmente pueden reproducirse las condiciones

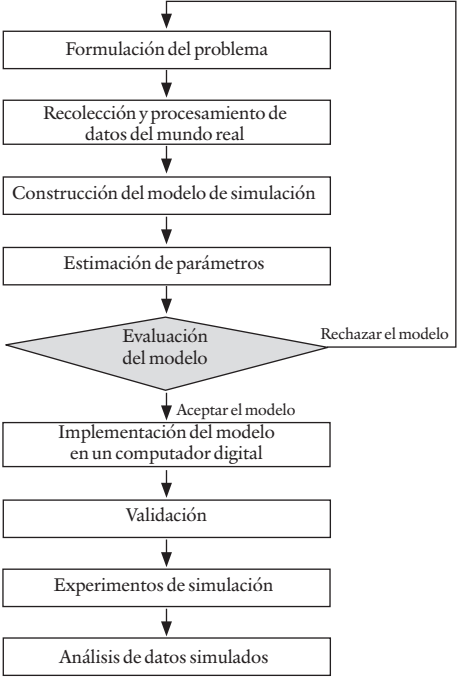
reales del terreno. Así, hay una gran incertidumbre asociada a las propiedades geológicas y mecánicas de las rocas.

Los métodos determinísticos asumen que toda la incertidumbre anotada es tomada en cuenta en los factores de seguridad utilizados en el diseño. Sin embargo, no es posible considerar tanta incertidumbre en un solo valor como el factor de seguridad. Por ello, a partir de la década de los 80 del siglo anterior, las metodologías determinísticas fueron reemplazadas paulatinamente por enfoques más realistas como las metodologías probabilísticas.

Entre las metodologías probabilísticas, la simulación de Montecarlo ha ganado bastante popularidad para estimar la probabilidad de fallamiento de un talud en roca, en el que la modalidad de fallamiento prevista es la falla en cuña. Para la simulación de Montecarlo se seguirá el procedimiento que se muestra en la Figura 5.

El objetivo de la simulación de Montecarlo en este trabajo se expresa en la siguiente hipótesis: es factible construir un modelo de simulación de Montecarlo, para estimar la probabilidad de fallamiento de un talud en roca, en el que la modalidad de fallamiento prevista es la falla en cuña. Esta hipótesis será aceptada si

los resultados obtenidos con el modelo de simulación son coherentes con la realidad.



**Figura 5.** Procedimiento de la simulación de Montecarlo.

Un resultado coherente con la realidad es, por ejemplo, que para ángulos de talud bajos y alturas de cuña pequeñas, la probabilidad de fallamiento sea prácticamente nula o igual a cero; o que para ángulos de talud parados y alturas de cuña grandes, la probabilidad de fallamiento sea grande (prácticamente igual a uno o cien por ciento). El modelo de simulación utilizó la información correspondiente al talud existente en la zona sud de la ciudad

de Oruro (serranías de Oruro entre las calles Washington y Camacho).

Es importante identificar la información requerida para la simulación. Esta puede clasificarse en tres: 1) información relacionada con la geometría del talud; 2) información vinculada a las propiedades mecánicas de la roca; y 3) otra información. La construcción del modelo de simulación incluye: la definición de variables y parámetros; la definición de las relaciones funcionales; y la construcción del modelo de simulación.

Las variables y parámetros utilizados en el modelo de simulación son:

*Variables exógenas*

Son también denominadas variables independientes. Son variables que introducen información al modelo de simulación:

- psia = Buzamiento del plano A
- psib = Buzamiento del plano B
- psis = Buzamiento de la superficie superior del talud
- psi5 = Ángulo de inclinación de la línea de intersección de los planos A y B
- titaab = Ángulo entre los planos A y B
- tita24 = Ángulo entre las intersecciones 2 y 4
- tita45 = Ángulo entre las intersecciones 4 y 5

|        |   |                                             |
|--------|---|---------------------------------------------|
| tita2a | = | Ángulo entre la intersección 2 y el plano A |
| tita13 | = | Ángulo entre las intersecciones 1 y 3       |
| tita35 | = | Ángulo entre las intersecciones 3 y 5       |
| tita1b | = | Ángulo entre la intersección 1 y el plano B |
| phia   | = | Ángulo de fricción interna del plano A      |
| phib   | = | Ángulo de fricción interna del plano B      |
| ca     | = | Cohesión del plano A                        |
| cb     | = | Cohesión del plano B                        |
| gamaa  | = | Peso específico del agua                    |
| gamar  | = | Peso específico de la roca                  |

### *Variables de estado*

Son las variables utilizadas al interior del modelo de simulación:

|         |   |                                                          |
|---------|---|----------------------------------------------------------|
| n       | = | Número de experimentos de simulación                     |
| i       | = | Contador de experimentos de simulación                   |
| nf      | = | Número de experimentos de simulación en los que el talud |
| fallafs | = | Factor de seguridad                                      |
| sumfs   | = | Acumulador de factores de seguridad                      |

### *Variables endógenas*

Son las variables que recogen los resultados generados por el modelo de simulación:

|     |   |                                        |
|-----|---|----------------------------------------|
| pf  | = | Probabilidad del fallamiento del talud |
| fse | = | Factor de seguridad promedio           |

### *Parámetros*

Los parámetros del presente modelo de simulación son:

|          |   |                 |
|----------|---|-----------------|
| psitalud | = | Ángulo de talud |
| h        | = | Altura talud    |
| hc       | = | Altura de cuña  |

Vale decir que el modelo de simulación fue utilizado en la estimación de las variables endógenas para combinaciones de valores específicos de los parámetros.

### *Relaciones funcionales*

Las relaciones funcionales del modelo de simulación incluyen: las características de operación de las variables; las identidades que relacionan las variables; los supuestos asumidos para posibilitar el modelo de simulación.

### *Características de operación*

Las siguientes variables exógenas, por su naturaleza, son consideradas como variables aleatorias en el modelo de simulación:

|      |   |                                        |
|------|---|----------------------------------------|
| phia | = | Ángulo de fricción interna del plano A |
| phib | = | Ángulo de fricción interna del plano B |
| ca   | = | Cohesión del plano A                   |
| cb   | = | Cohesión del plano B                   |

Cada una de estas variables es caracterizada por una distribución probabilística (por una función de densidad de probabilidad). Se sabe que, si algunas de las variables exógenas son caracterizadas como variables aleatorias, las variables endógenas también son aleatorias.

### *Identidades*

El modelo de simulación utiliza las siguientes identidades:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{\sin tita24}{\sin tita45 \cos tita2a} \\
 y &= \frac{\sin tita13}{\sin tita35 \cos tita1b} \\
 a &= \frac{\cos psia - \cos psib \cos titaab}{\sin psi5 \sin^2 titaab} \\
 b &= \frac{\cos psib - \cos psia \cos titaab}{\sin psi5 \sin^2 titaab} \\
 fs &= \frac{3 ca}{\gamma m m a r h c} x + \frac{3 c b}{\gamma m m a r h c} y \\
 &\quad + \left( a - \frac{\gamma m m a a}{2 \gamma m m a r} x \right) \tan phi a + \left( b - \frac{\gamma m m a a}{2 \gamma m m a r} y \right) \tan phi b \\
 sumfs &= sumfs + fs \\
 efs &= \frac{sumfs}{n} \\
 pf &= \frac{nf}{n}
 \end{aligned}$$

Como supuestos, se asume que la distribución (función de densidad de probabilidad) del ángulo de fricción interna es la misma en ambos planos de deslizamiento. De igual manera,

se asume que la distribución (función de densidad de probabilidad) de la cohesión de la roca es la misma en ambos planos de deslizamiento.

## El modelo de simulación

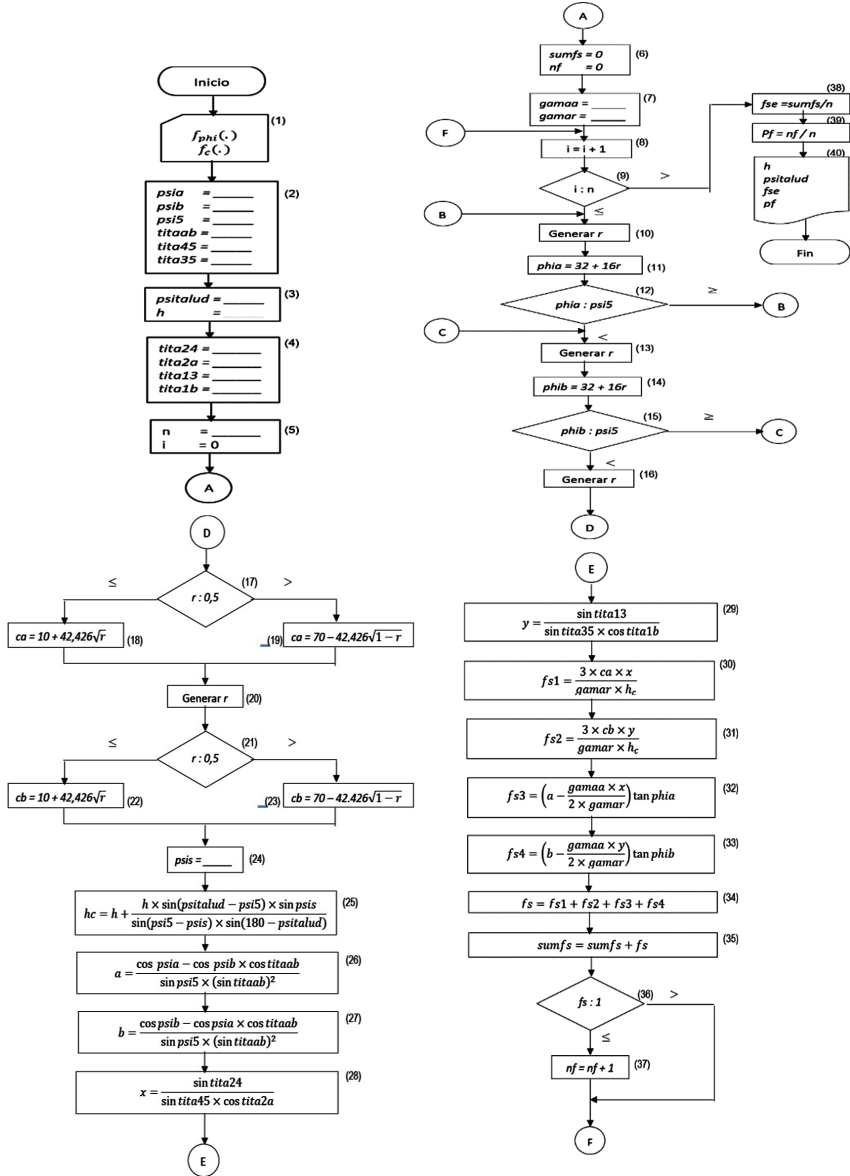


Figura 6. El modelo de simulación.

### *Estimación de parámetros*

Tal como se señaló en el punto anterior, las siguientes variables exógenas, por su naturaleza, han sido consideradas como variables aleatorias en el modelo de simulación:

- phia = Ángulo de fricción interna del plano A
- phib = Ángulo de fricción interna del plano B
- ca = Cohesión del plano A
- cb = Cohesión del plano B

A continuación, se caracterizan cada una de estas variables aleatorias (ángulo de fricción interna y cohesión de la roca del talud) por una distribución probabilística (o función de densidad de probabilidad), con base en los datos obtenidos a partir de las pruebas de corte directo efectuadas en laboratorio.

### *Generación de valores aleatorios de ángulo de fricción interna*

Habiendo visto que los valores de ángulo de fricción interna de la roca del talud siguen una distribución uniforme con  $a=32^\circ$  y  $b=48^\circ$ , en la simulación los valores del ángulo de fricción interna de los planos A y B que forman la cuña en el talud fueron generados utilizando las siguientes expresiones:

Donde:

$$hia = a + (b - a)r = 32 + (48 - 32)r = 32 + 16r$$

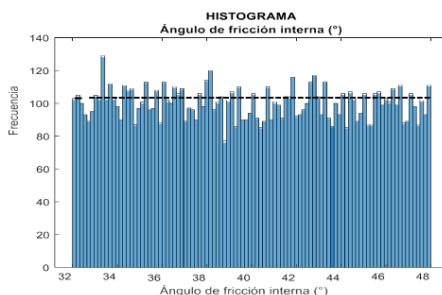
$$phib = a + (b - a)r = 32 + (48 - 32)r = 32 + 16r$$

phia = Ángulo de fricción interna del plano A

phib = Ángulo de fricción interna del plano B

$r$  = Número aleatorio que sigue una distribución uniforme en el intervalo (0;1), proporcionado por una fuente generadora de números aleatorios.

La Figura 7 muestra un histograma de 10000 valores de ángulo de fricción interna generados a partir de los generadores anotados. Este histograma fue generado con Matlab. La forma del histograma es la esperada.



**Figura 7.** Histograma de valores aleatorios de ángulo de fricción interna.

### *Generación de valores aleatorios de cohesión*

Debido a que los valores de cohesión de la roca del talud siguen una distribución triangular con  $a=10$ ,  $b=40$  y  $c=70$ , en los experimentos de simulación los

valores de cohesión en los planos A y B que forman la cuña en el talud fueron generados aleatoriamente, utilizando las siguientes expresiones:

Siendo,

$$\frac{b-a}{c-d} = \frac{40 - 10}{70 - 10} = 0,5$$

Se tiene que,

$$c_a = a + \sqrt{(c-a)(b-a)r} = 10 + 42,426\sqrt{r}; \text{ si } r \leq 0,5$$

$$c_a = c - \sqrt{(c-a)(c-b)(1-r)} = 70 - 42,426\sqrt{1-r}; \text{ si } r > 0,5$$

De igual manera,

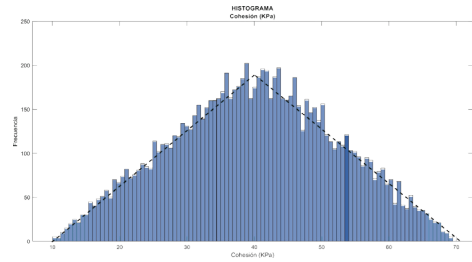
$$c_b = a + \sqrt{(c-a)(b-a)r} = 10 + 42,426\sqrt{r}; \text{ si } r \leq 0,5$$

$$c_b = c - \sqrt{(c-a)(c-b)(1-r)} = 70 - 42,426\sqrt{1-r}; \text{ si } r > 0,5$$

Donde:

- $c_a$  = Cohesión de la roca en el plano A  
 $c_b$  = Cohesión de la roca en el plano B  
 $r$  = Número aleatorio que sigue una distribución uniforme en el intervalo (0;1), proporcionado por una fuente generadora de números aleatorios.

La Figura 8 muestra un histograma de 1000 valores de ángulo de fricción interna generados a través de los generadores anotados. Este histograma fue generado con Matlab. La forma de este histograma es la esperada.



**Figura 8.** Histograma de valores aleatorios de cohesión

### *Validación del modelo de simulación*

Dos pruebas de naturaleza estadística parecen apropiadas para la validación de modelos de simulación. Primero, que tan bien se comportan los valores simulados de las variables endógenas comparados con datos históricos conocidos, si se dispone de datos históricos. Segundo, que tan exactas son las predicciones del modelo de simulación referidas al comportamiento del sistema real en periodos de tiempo futuros.

Estas pruebas fueron posibles cuando se llevaron a cabo los experimentos de simulación y se efectúe el análisis de los resultados obtenidos.

### *Experimentos de simulación*

Los experimentos de simulación están relacionados con el talud diseñado, utilizando métodos determinísticos. Tal como se dijo anteriormente, luego de un mapeo geológico estructural de

dicho talud y el análisis estereográfico correspondiente, se vio que la modalidad previsible de un posible fallamiento es la falla en cuña.

El diseño determinístico señala que dicho talud es estable, afirmación basada en el factor de seguridad calculado ( $f_s = 1,6$ ). Sin embargo, en este y otros casos, el factor de seguridad es insuficiente para expresar toda la incertidumbre asociada a las variables utilizadas para su cálculo.

Se efectuó entonces el diseño probabilístico de dicho talud. Se buscaba añadir al factor de seguridad, la probabilidad de su ocurrencia. En el diseño de los experimentos de simulación, inicialmente, se deben definir los posibles valores para

los parámetros de la simulación: el buzamiento de la cara del talud ( $\psi$ ) y la altura del talud ( $h$ ).

Se han tomado como posibles valores del parámetro de altura del talud los siguientes: 10 m; 15 m; 20 m; 25 m; 30 m; 35 m; 40 m y 45 m. También se han utilizado los siguientes valores: peso específico del agua ( $\gamma_a$ ) 9,81 KN/m<sup>3</sup> y peso específico de la roca del talud ( $\gamma_r$ ) 20,00 KN/m<sup>3</sup>.

La Tabla 2 muestra los factores de seguridad promedio obtenidos con 1000 experimentos de simulación. La Tabla 3 muestra nuevamente las probabilidades de falla del talud obtenidas también con 1000 experimentos de simulación.

Tabla 2. Factores de seguridad esperados o promedio.

| Altura del talud (m) | Buzamiento de la cara del talud |         |         |         |         |         |         |
|----------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                      | 73°                             | 75°     | 77,5°   | 80°     | 82,5°   | 85°     | 87,5°   |
| 10                   | 11,4083                         | 7,7121  | 4,9325  | 3,6546  | 2,6689  | 2,3130  | 2,0004  |
| 15                   | 5,7969                          | 3,8312  | 2,5027  | 1,9138  | 1,3980  | 1,2138  | 1,0565  |
| 20                   | 2,9223                          | 1,9577  | 1,2629  | 0,9565  | 0,7545  | 0,6512  | 0,5947  |
| 25                   | 1,0820                          | 0,7902  | 0,5444  | 0,4565  | 0,3855  | 0,3207  | 0,2962  |
| 30                   | -0,0397                         | 0,0120  | 0,0973  | 0,0851  | 0,1139  | 0,1171  | 0,1214  |
| 35                   | -0,7690                         | -0,5155 | -0,2623 | -0,1721 | 0,0666  | -0,0492 | -0,0210 |
| 40                   | -1,4602                         | -0,9358 | -0,5244 | -0,3839 | -0,2040 | -0,1657 | -0,1222 |
| 45                   | -1,9691                         | -1,2525 | -0,7498 | -0,5354 | -0,2910 | -0,2502 | -0,2081 |

**Tabla 3.** Probabilidad de falla del talud.

| Altura del talud (m) | Buzamiento de la cara del talud |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 73°                             | 75°   | 77,5° | 80°   | 82,5° | 85°   | 87,5° |
| 10                   | 0,000                           | 0,004 | 0,070 | 0,010 | 0,031 | 0,065 | 0,063 |
| 15                   | 0,022                           | 0,042 | 0,096 | 0,138 | 0,265 | 0,355 | 0,438 |
| 20                   | 0,178                           | 0,236 | 0,390 | 0,515 | 0,723 | 0,796 | 0,881 |
| 25                   | 0,482                           | 0,559 | 0,735 | 0,835 | 0,953 | 0,979 | 0,994 |
| 30                   | 0,767                           | 0,859 | 0,943 | 0,978 | 0,998 | 1,000 | 1,000 |
| 35                   | 0,931                           | 0,978 | 0,990 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 40                   | 0,992                           | 0,996 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 45                   | 0,999                           | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

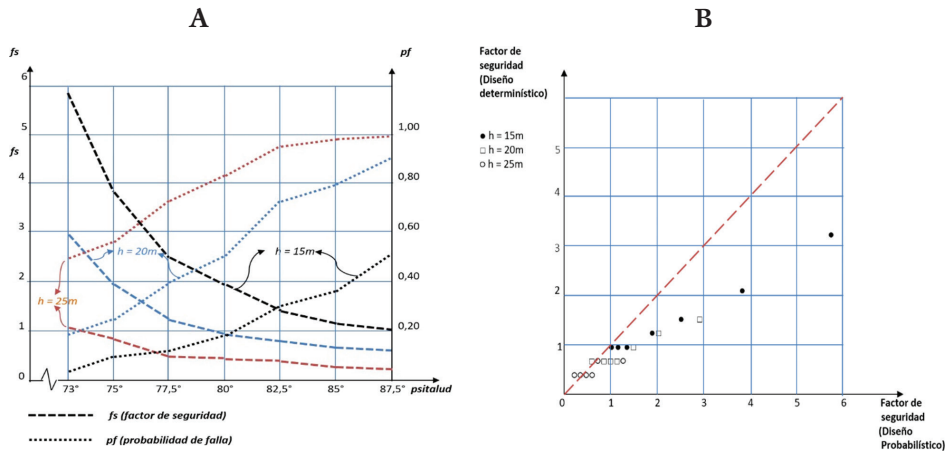
Los valores de la Tabla 2 y 3 son representados en la Figura 9 para tres valores de altura del talud ( $h$ ), ( $h = 15$  m,  $h = 20$  m y  $h = 25$  m), con la finalidad de facilitar el análisis de los resultados obtenidos.

La Tabla 4 muestra factores de seguridad para diferentes valores

de buzamiento de la cara del talud, obtenidos con el diseño determinístico y los factores de seguridad obtenidos con el diseño probabilístico. Se tomaron en cuenta tres valores para la altura del talud (15 m, 20 m y 25 m).

**Tabla 4.** Factores de seguridad obtenidos con el diseño determinístico y con el diseño probabilístico.

| Altura Talud (m) | Diseño         | Buzamiento de la cara del talud |       |       |       |       |       |       |
|------------------|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |                | 73°                             | 75°   | 77,5° | 80°   | 82,5° | 85°   | 87,5° |
| 15               | Determinístico | 3,118                           | 2,261 | 1,425 | 1,165 | 1,041 | 1,020 | 1,018 |
|                  | Probabilístico | 5,797                           | 3,831 | 2,503 | 1,914 | 1,398 | 1,214 | 1,056 |
| 20               | Determinístico | 1,640                           | 1,231 | 0,833 | 0,709 | 0,650 | 0,640 | 0,638 |
|                  | Probabilístico | 2,922                           | 1,958 | 1,263 | 0,956 | 0,754 | 0,651 | 0,595 |
| 25               | Determinístico | 0,753                           | 0,614 | 0,477 | 0,435 | 0,415 | 0,411 | 0,411 |
|                  | Probabilístico | 1,082                           | 0,790 | 0,544 | 0,456 | 0,358 | 0,321 | 0,296 |



**Figura 9.** A) factores de seguridad y probabilidades de falla para diferentes alturas de talud; B) comparación factores de seguridad.

La Figura 9A compara los factores de seguridad obtenidos con el diseño determinístico y los obtenidos con el diseño probabilístico correspondiente a 1000 experimentos.

## Resultados

Los resultados de la simulación corroboran que, cuanto mayor sea el buzamiento de la cara del talud, más inestable es el talud. Por ejemplo, para una altura de talud igual a 20 m, si el buzamiento de la cara del talud es igual a 73°, el factor de seguridad promedio es igual a 2,922 (Tabla 7) y la probabilidad de falla de este talud es igual a 0,15 o 15% (Tabla 3). Sin embargo, si el buzamiento de la cara del talud es igual a 82,5°, el talud se

hace totalmente inestable ya que el factor de seguridad promedio es igual a 0,798 (Tabla 2) y la probabilidad de falla del talud se incrementa a 0,723 o 72,3 % (Tabla 3).

Los resultados de la simulación también corroboran que, cuanto mayor sea la altura del talud, más inestable se hace el talud. Por ejemplo, para un buzamiento de la cara del talud igual a 75°, si la altura del talud es igual a 15 m, el talud es estable (factor de seguridad igual a 3,831 y probabilidad de falla del talud igual a 0,042 o 4,2 %) (Tabla 2 y 3). Sin embargo, si la altura del talud se incrementa a 25 m, el talud se hace totalmente inestable, el factor de seguridad del talud se reduce a 0,790 y la probabilidad de falla del talud se incrementa a 0,559 o 55,9 % (Tabla 2 y 3, respectivamente).

Las dos observaciones descritas anteriormente pueden ser mejor apreciadas en la Figura 9A. En esta figura también se puede observar que para valores menores del buzamiento de la cara del talud (por ejemplo  $73^\circ$ ). Las diferencias entre los factores de seguridad para diferentes alturas del talud son grandes. Sin embargo, a medida que el buzamiento del talud crece, las diferencias entre los factores de seguridad se van haciendo más pequeñas.

Por otro lado, las observaciones descritas anteriormente validan plenamente el modelo de simulación utilizado. Los resultados obtenidos con la simulación son intuitivamente coincidentes con resultados históricos o reales.

Es importante observar que, para alturas de talud grandes, por ejemplo 45 m en el presente caso, el talud se hace absolutamente inestable. El factor de seguridad promedio es negativo (Tabla 2), y la probabilidad de falla es igual a 1,000 o 100 % (Tabla 3) para cualquier valor factible del buzamiento de la cara del talud. De igual manera, en el presente caso, para buzamientos de la cara del talud superiores a  $80^\circ$  y a alturas de talud superiores a 20 m, el talud se hace inestable. El factor de seguridad es menor a 1,00 y la probabilidad de falla del talud es superior a 0,515 o 51,5 % y

tiende rápidamente a 1,000 o 100 % (Tabla 2 y 3).

La Tabla 4 muestra los factores de seguridad obtenidos con el diseño determinístico y los factores de seguridad obtenidos con el diseño probabilístico para tres valores de la altura del talud. La Figura 9 muestra la relación existente entre ambos factores de seguridad y da cuenta de una relación aparentemente lineal entre los factores de seguridad determinísticos y las medias de los factores de seguridad probabilísticos. Allí, los primeros presentan valores menores a los obtenidos mediante la simulación de Montecarlo. Los resultados muestran que, cuando el buzamiento de la cara del talud es menor (por ejemplo,  $73^\circ$ ), ambos factores de seguridad tienden a asemejarse entre sí; mientras que, cuando el ángulo de buzamiento del talud se incrementa (por ejemplo,  $87,5^\circ$ ), los factores de seguridad probabilísticos no solo son mayores, sino que además la dispersión entre cada caso se incrementa.

Los resultados obtenidos también muestran que, a medida que la probabilidad de falla del talud se incrementa, ambos factores de seguridad tienden a asemejarse entre sí; mientras que, cuando la probabilidad de falla del talud disminuye, los factores de seguridad probabilísticos se hacen

mayores a los factores de seguridad determinísticos.

La Figura 9B muestra claramente que los factores de seguridad obtenidos con métodos determinísticos son mucho más conservadores (menores) que los obtenidos mediante la simulación de Montecarlo. Esta puntualización podría ser muy útil a la hora de tomar decisiones.

Por último, el diseño probabilístico de un talud en roca en el que se prevé una falla en cuña ha sido posible gracias a la aplicación de la simulación de Montecarlo; y la aplicación de la simulación de Montecarlo ha sido posible gracias a la tecnología disponible en la actualidad. La información proporcionada por el diseño probabilístico es realmente importante. Saber, por ejemplo, que si la altura del talud en estudio fuera igual a 10 m y el ángulo de talud fuera igual a  $77^\circ$ , el factor de seguridad es igual a 7,712 es una buena noticia. Saber, además, que la probabilidad de falla de dicho talud es igual a 0,004 o 0,4 % es reconfortante. De igual manera, saber que, si la altura del talud en estudio fuera igual a 35 m sin importar el buzamiento de la cara del talud (cualquier valor mayor a  $72^\circ$ ), el factor de seguridad es negativo y, consecuentemente, la falla del talud es inminente. Saber, además, que la probabilidad de falla del talud es 1,00

o 100 % ratifica la inminencia de falla del talud.

## Conclusiones

Se ha verificado que la simulación de Montecarlo permite el análisis probabilístico de la estabilidad de taludes en roca en los que la modalidad previsible de fallamiento es la falla en cuña. En otras palabras, esta metodología permite enriquecer la información proporcionada por un factor de seguridad sobre la estabilidad de un talud con la probabilidad de falla del talud. Si el factor de seguridad de un talud es, por ejemplo, igual a 1,2, teóricamente el talud es estable (factor de seguridad superior a la unidad). Sin embargo, ¿será realmente estable el talud? a sabiendas de la alta incertidumbre asociada a algunas de las variables que intervienen en el cálculo del factor de seguridad. Si el factor de seguridad viene acompañado de una probabilidad de falla del talud y el valor de esta probabilidad es, por ejemplo, igual a 0,010 o 1 %, el talud es efectivamente estable. Por el contrario, si la probabilidad de falla del talud es igual a 0,450 o 45 %, se tendrán dudas sobre la estabilidad del talud. En definitiva, conocer la probabilidad de falla de un talud permite tomar mejores decisiones.

Por otro lado, en el análisis de los resultados de la simulación se ha podido ver que el diseño probabilístico de taludes en roca es una buena herramienta aplicable en la actualidad gracias al avance de la tecnología. Tiene la ventaja de tomar en cuenta la incertidumbre que la naturaleza impone sobre algunas de las variables utilizadas en el diseño determinístico. El uso simultáneo de ambas metodologías (determinística y probabilística) siempre será beneficioso para la ingeniería civil, de minas, geológica y la ingeniería geotécnica no solo para obtener factores de seguridad asociados a taludes en roca, sino también para ampliar la visión y aplicar

el análisis probabilístico al diseño de fundaciones, presas, estructuras de contención y muchas otras estructuras.

Si bien se pueden observar valores negativos en los factores de seguridad y sabiendo que este fenómeno físicamente no es posible por la definición de factor de seguridad, se ha visto conveniente dejar estos valores para evidenciar que cuanto más bajo el factor de seguridad, es más alta la probabilidad de falla.

## Referencias

- [1] D. Wyllie y C. Mah, *Rock Slope Engineering*. New York: Taylor & Francis, 2005.

El Congreso Internacional en Innovación, Desarrollo y Aplicaciones en Ingeniería Civil CI-IDeA fue un evento organizado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás, seccional Villavicencio. Su objetivo es proporcionar a la comunidad académica y profesional, pero también a los empresarios, un escenario para discutir, divulgar y fortalecer la investigación científica y las redes de conocimiento acerca de las nuevas tendencias de la ingeniería civil, favoreciendo la actualización e intercambio de experiencias nacionales e internacionales con el sector empresarial. Cuenta con la participación de científicos, académicos e investigadores, tanto de Colombia como del exterior, en torno a temáticas como gestión del riesgo y desastres naturales, ingeniería estructural, geotecnia y recursos hídricos.