



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Estimación de la capacidad de  
resiliencia de sistemas de  
excavaciones para sótanos en  
sectores urbanos. Estudio de caso:  
Falla edificio Green Office en la  
Avenida Carrera 11 N° 98-07 – Bogotá  
D.C.**

**Yuli Aleyda Delgado González**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil y Agrícola  
Bogotá D.C., Colombia

2023

# **Estimación de la capacidad de resiliencia de sistemas de excavaciones para sótanos en sectores urbanos. Estudio de caso: Falla edificio Green Office en la Avenida Carrera 11 N° 98-07 – Bogotá D.C.**

**Yuli Delgado González**

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería - Geotecnia**

Director:  
Ph.D Jorge Pineda Jaimes

Línea de Investigación: Excavaciones subterráneas.

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C., Colombia

2023

*A mi madre y abuelos que con su ejemplo de tenacidad han hecho de mi un mejor ser humano, que no se rinde frente a la adversidad y con amor nos enseñan a ser resilientes. A mi familia que sigue cada uno de mis pasos y me anima a seguir adelante por mis sueños.*

# Declaración de obra original


Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Nombre: Yuli Aleyda Delgado González

Fecha 31/01/2023

## Resumen

En la actualidad el concepto de resiliencia es aplicado a diferentes áreas del conocimiento, y en ingeniería es necesario el aporte de definiciones y análisis que permitan la consolidación de los criterios para el cálculo de la resiliencia de un sistema determinado, con el propósito de ser un indicador en la gestión del riesgo y la mitigación de eventos amenazantes. Con el fin de aportar a la definición de resiliencia en el campo de la ingeniería geotécnica y de metodologías que permitan el cálculo de los parámetros que la componen, en este trabajo se hace una propuesta metodológica para la estimación del índice de resiliencia de una excavación en entorno urbano. Por medio de una revisión de los principales conceptos de resiliencia, se describen los criterios que conforman los parámetros resilientes que son Robustez, Redundancia, Capacidad de Gestión y Recuperación en un marco geotécnico. Para la agregación de los criterios se propone la teoría de conjuntos difusos que se basa en la lógica difusa que permite manejar la imprecisión y el procesamiento de la información. Para la agregación de los cuatro parámetros resilientes se propone el uso del Operador de promedio ponderado ordenado OWA (Ordered Weighted Averaging) por sus siglas en inglés, que permite modelar la actitud frente al riesgo del evaluador y obtener una valoración de tipo optimista, pesimista o neutra a partir de un coeficiente de orness ( $\alpha$ ). Finalmente, el índice de resiliencia es calculado como la razón entre la resiliencia en un momento previo al evento disruptivo y un momento posterior. Esta metodología es aplicada al estudio de caso Falla edificio Green Office en la Avenida Carrera 11 N° 98-07 – Bogotá D.C, el cual presentó fallas durante las excavaciones de los sótanos que afectaron el entorno por la presencia de deformaciones excesivas, ocasionando el cierre temporal de las vías y el parque contiguo a la excavación. Después de calcular los criterios y parámetros de resiliencia se encontró que el sistema conformado por la excavación y el entorno, no contaban con la robustez adecuada en el momento previo al evento de falla bajando la resiliencia del sistema, así como la pérdida de resiliencia debido a la falla de fondo de la excavación.

**Palabras clave: Resiliencia, Índice de Resiliencia, Lógica Difusa, Operadores de Agregación OWA.**

## Abstract

**Estimation of the resilience capacity of excavation systems for basements in urban sectors. Case study: Failure of the Green Office building at Avenida Carrera 11 N° 98-07 - Bogotá D.C.**

Currently, the concept of resilience is applied to different areas of knowledge, and in engineering it is necessary to provide definitions and analysis that allow the consolidation of criteria for the calculation of the resilience of a given system, with the purpose of being an indicator in risk management and mitigation of threatening events. In order to contribute to the definition of resilience in the field of geotechnical engineering and of methodologies that allow the calculation of the parameters that compose it, in this work a methodological proposal is made for the estimation of the resilience index of an excavation in an urban environment. By means of a review of the main concepts of resilience, the criteria that make up the resilient parameters are described, which are Robustness, Redundancy, Resourcefulness and Recovery in a geotechnical framework. For the aggregation of the criteria, the fuzzy set theory is proposed, which is based on fuzzy logic that allows handling imprecision and information processing. For the aggregation of the four resilient parameters, the use of the Ordered Weighted Averaging Operator (OWA) is proposed, which allows modeling the risk attitude of the evaluator and obtaining an optimistic, pessimistic or neutral assessment from an orness coefficient ( $\alpha$ ). Finally, the resilience index is calculated as the ratio between resilience at a time prior to the disruptive event and at a later time. This methodology is applied to the case study Green Office building failure at Avenida Carrera 11 N° 98-07 - Bogotá D.C., which presented failures during the excavation of the basements that affected the environment due to the presence of excessive deformations, causing the temporary closure of the roads and the park adjacent to the excavation. After calculating the resilience criteria and parameters, it was found that the system formed by the excavation and the surroundings did not have adequate robustness at the time prior to the failure event, lowering the resilience of the system, as well as the loss of resilience due to the failure at the bottom of the excavation.

**Keywords: Resilience, Resilience Index, Fuzzy Logic, OWA Aggregation Operators.**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de Fotografías .....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XV</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>17</b>
<b>1. Objetivos.....</b>	<b>21</b>
1.1    Objetivo general.....	21
1.2    Objetivos específicos .....	21
<b>2. Justificación .....</b>	<b>22</b>
<b>3. Marco Conceptual.....</b>	<b>27</b>
3.1    Conceptos de resiliencia.....	28
3.2    Resiliencia en infraestructura e índice de resiliencia .....	35
3.3    Evaluación de la resiliencia .....	37
3.4    Resiliencia en geotecnia .....	41
3.5    Gestión del riesgo .....	45
3.6    Excavaciones en entornos urbanos.....	47
3.7    Lógica difusa.....	49
3.7.1    Fundamentos de la lógica difusa .....	50
3.7.2    Inferencia difusa .....	51
3.8    Operadores de agregación .....	53
<b>4. Marco metodológico para la evaluación de resiliencia en excavaciones .....</b>	<b>59</b>
4.1    Definir los términos de cada parámetro de resiliencia .....	59
4.2    Definir el modelo de lógica difusa .....	60
4.3    Cálculo de los parámetros de resiliencia .....	61
4.4    Evaluación de resiliencia con el operador OWA.....	61
<b>5. Caso de estudio Edificio Green Office.....</b>	<b>62</b>
5.1    Resumen .....	62
5.2    Localización .....	64
5.3    Descripción del proyecto .....	64
5.4    Características del evento y posibles causas .....	65

<b>6. Análisis geotécnico de la excavación .....</b>	<b>68</b>
6.1 Perfil geotécnico .....	69
6.2 Análisis de equilibrio Limite .....	71
6.3 Análisis de deformaciones.....	74
<b>7. Definición de parámetros de resiliencia de la excavación .....</b>	<b>77</b>
7.1 Robustez .....	78
7.1.1 Factores de seguridad .....	81
7.1.2 Probabilidad de falla .....	85
7.1.3 Análisis de deformaciones .....	89
7.2 Redundancia .....	100
7.2.1 Niveles de servicio - vías .....	101
7.2.2 Redes de servicios.....	107
7.2.3 Deformaciones en el entorno .....	109
7.3 Capacidad de Gestión .....	114
7.3.1 Control y monitoreo geotécnico .....	115
7.3.2 Políticas de gestión frente al riesgo .....	118
7.3.3 Caracterización socio económica del área .....	122
7.4 Recuperación .....	129
7.4.1 Nivel de intervención.....	129
7.4.2 Escenarios de respuesta .....	130
<b>8. Cálculo de parámetros resilientes para el caso de estudio .....</b>	<b>134</b>
8.1 Parámetros de resiliencia en t1 .....	135
8.1.1 Robustez.....	135
8.1.2 Redundancia.....	138
8.1.3 Capacidad de gestión .....	145
8.1.4 Recuperación.....	151
8.2 Parámetros de resiliencia en t2 .....	152
8.2.1 Robustez.....	153
8.2.2 Redundancia.....	155
8.2.3 Capacidad de gestión .....	166
8.2.4 Recuperación.....	168
<b>9. Cálculo de Resiliencia.....</b>	<b>170</b>
9.1 Índice de resiliencia .....	178
9.2 Función de desempeño .....	179
<b>10. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>181</b>
10.1 Conclusiones .....	181
10.2 Recomendaciones.....	185
<b>A. Anexo: Modelos Slide de la excavación.....</b>	<b>187</b>
<b>B. Anexo: Modelos Plaxis 2D de la excavación .....</b>	<b>189</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>190</b>



## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 3-1:</b>	Representación teórica de la resiliencia basada en el análisis de riesgo 28
<b>Figura 3-2:</b>	Fases de la resiliencia en infraestructura. .... 31
<b>Figura 3-3:</b>	Pérdida típica de resiliencia a lo largo del tiempo..... 33
<b>Figura 3-4:</b>	Representación teórica de la resiliencia de un sistema ..... 34
<b>Figura 3-5:</b>	Comportamiento de un sistema tras un evento disruptivo. .... 34
<b>Figura 3-6:</b>	Contexto de los sistemas en la evaluación de resiliencia. .... 37
<b>Figura 3-7:</b>	Componentes de la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD). .... 46
<b>Figura 3-8:</b>	Sistema de inferencia difuso. .... 52
<b>Figura 3-9:</b>	Familias de operadores de agregación..... 56
<b>Figura 3-10:</b>	Pesos en el operador OWA usando el método lineal. .... 58
<b>Figura 5-1:</b>	Cronología de eventos..... 63
<b>Figura 5-2:</b>	Localización del proyecto Green Office. Imagen de Google Earth. .... 64
<b>Figura 6-1:</b>	Corte longitudinal de la excavación. .... 69
<b>Figura 6-2:</b>	Sección 1, perfil de suelo paralelo a la carrera 11..... 70
<b>Figura 6-3:</b>	Sección 2, perfil de suelo perpendicular a la carrera 11..... 71
<b>Figura 6-4:</b>	Configuración de la Sección de análisis 1 - Slide. .... 72
<b>Figura 6-5:</b>	Configuración de la Sección de análisis 2 - Slide. .... 72
<b>Figura 6-6:</b>	Configuración de la Sección de análisis 1- Plaxis. .... 75
<b>Figura 6-7:</b>	Configuración de la Sección de análisis 1- Plaxis. .... 75
<b>Figura 7-1:</b>	Variación del factor de seguridad en sección 1 - carga 8 kN/m..... 82
<b>Figura 7-2:</b>	Variación del factor de seguridad en sección 2 - carga 8 kN/m..... 83
<b>Figura 7-3:</b>	Variación del factor de seguridad en sección 1 - carga 16 kN/m..... 83
<b>Figura 7-4:</b>	Variación del factor de seguridad en sección 2 - carga 16 kN/m..... 84
<b>Figura 7-5:</b>	Variación de la probabilidad de falla sección 1 - carga 8 kN/m. .... 87
<b>Figura 7-6:</b>	Variación de la probabilidad de falla sección 1 - carga 16 kN/m. .... 87
<b>Figura 7-7:</b>	Variación de la probabilidad de falla sección 2 - carga 8 kN/m. .... 88
<b>Figura 7-8:</b>	Variación de la probabilidad de falla sección 2 - carga 16 kN/m. .... 88
<b>Figura 7-9:</b>	Excavación primer sótano – Método Constructivo 1..... 92
<b>Figura 7-10:</b>	Excavación tercer sótano - Método Constructivo 1. .... 92
<b>Figura 7-11:</b>	Primera etapa de la primera excavación – Método Constructivo 2. .... 93
<b>Figura 7-12:</b>	Segunda etapa de la primera excavación – Método Constructivo 2..... 93
<b>Figura 7-13:</b>	Primera etapa, tercera excavación – Método Constructivo 2. .... 94
<b>Figura 7-14:</b>	Segunda etapa, tercera excavación – Método Constructivo 2. .... 94
<b>Figura 7-15:</b>	Configuración sistema difuso para la robustez en FuzzyLogic..... 97
<b>Figura 7-16:</b>	Funciones de membresía de los criterios de entrada y la salida. .... 98

<b>Figura 7-17:</b>	Relaciones difusas entre criterios de robustez. ....	100
<b>Figura 7-18:</b>	Velocidad en km/h de los niveles de servicio por tipo de terreno. ....	103
<b>Figura 7-19:</b>	Criterios para niveles de servicio en vías multicarril. ....	103
<b>Figura 7-20:</b>	Configuración sistema difuso para la Redundancia.....	111
<b>Figura 7-21:</b>	Funciones de membresía de cada criterio y salida. ....	112
<b>Figura 7-22:</b>	Relaciones difusas entre parámetros de redundancia.....	114
<b>Figura 7-23:</b>	Componentes de la emergencia según SDGR-CC. ....	119
<b>Figura 7-24:</b>	Configuración sistema difuso para la Capacidad de Gestión. ....	125
<b>Figura 7-25:</b>	Funciones de membresía de los criterios de entrada y salida.....	126
<b>Figura 7-26:</b>	Relaciones difusas entre parámetros de capacidad de gestión. ....	128
<b>Figura 7-27:</b>	Configuración sistema difuso para la Recuperación.....	132
<b>Figura 7-28:</b>	Funciones de membresía de cada criterio y salida. ....	132
<b>Figura 7-29:</b>	Relación difusas entre parámetros de recuperación. ....	133
<b>Figura 8-1:</b>	Factor de seguridad y probabilidad de falla sección 1.....	135
<b>Figura 8-2:</b>	Factor de seguridad y probabilidad de falla sección 2.....	136
<b>Figura 8-3:</b>	Inferencia del control difuso para la robustez en t1. ....	137
<b>Figura 8-4:</b>	Condiciones de la Carrera 11 y Calle 98 (22/01/2010).....	139
<b>Figura 8-5:</b>	Distribución de la red de acueducto colindante al proyecto. ....	141
<b>Figura 8-6:</b>	Distribución de la red de alcantarillado pluvial colindante. ....	142
<b>Figura 8-7:</b>	Distribución de la red de alcantarillado sanitario colindante. ....	142
<b>Figura 8-8:</b>	Inferencia del control difuso para la redundancia en t1. ....	144
<b>Figura 8-9:</b>	Estrato manzana donde se implanta el edificio Green Office. ....	147
<b>Figura 8-10:</b>	Uso predominante de la manzana donde se localiza el Green Office. ...	147
<b>Figura 8-11:</b>	Valor de referencia m <sup>2</sup> donde se localiza el Green Office. ....	148
<b>Figura 8-12:</b>	Avalúo comercial por manzana (%/m <sup>2</sup> ).....	149
<b>Figura 8-13:</b>	Inferencia del control difuso para la Capacidad de gestión en t1. ....	150
<b>Figura 8-14:</b>	Inferencia del control difuso para la Recuperación en t1.....	152
<b>Figura 8-15:</b>	Inferencia del control difuso para la Robustez en t2.....	154
<b>Figura 8-16:</b>	Identificación de redes de alcantarillado sanitario y pluvial. ....	159
<b>Figura 8-17:</b>	Trabajos realizados para el control de suministro de agua. ....	160
<b>Figura 8-18:</b>	Inferencia del control difuso para la Redundancia en t2.....	165
<b>Figura 8-19:</b>	Inferencia del control difuso para la Capacidad de gestión en t2. ....	167
<b>Figura 8-20:</b>	Inferencia del control difuso para la Recuperación en t2.....	169
<b>Figura 9-1:</b>	Resiliencia del sistema previo al evento para Ornes entre 0 y 1. ....	173
<b>Figura 9-2:</b>	Resiliencia del sistema posterior al evento para Ornes entre 0 y 1.....	174
<b>Figura 9-3:</b>	Comparativa de Resiliencia en t1 y t2. ....	175
<b>Figura 9-4:</b>	Distribución de parámetros de resiliencia en t1 y t2 – actitud pesimista	176
<b>Figura 9-5:</b>	Distribución de parámetros de resiliencia en t1 y t2 – actitud optimista	176
<b>Figura 9-6:</b>	Índice de resiliencia del sistema de excavación. ....	179
<b>Figura 9-7:</b>	Función de desempeño del sistema de excavación. ....	180

## Lista de Fotografías

<b>Fotografía 8-1:</b>	Estados de la vía Calle 98 entre Carreras 11 y 11a.....	140
<b>Fotografía 8-2:</b>	Estados de la vía Carrera 11 entre calles 99 y 97a. ....	140
<b>Fotografía 8-3:</b>	Compromiso estructural de elementos de pantalla y columnas. ....	153
<b>Fotografía 8-4:</b>	Estado de las vías después de la falla de la excavación. ....	156
<b>Fotografía 8-5:</b>	Estado del parque sobre la Calle 98. ....	162
<b>Fotografía 8-6:</b>	Estado de los andes paralelos a la Carrera 11. ....	163
<b>Fotografía 8-7:</b>	Afectaciones a la edificación continua a la construcción. ....	164

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>	
<b>Tabla 3-1:</b>	Marco DPSIR para la evaluación de resiliencia. ....	40
<b>Tabla 3-2:</b>	Parámetros de resiliencia en excavaciones. ....	44
<b>Tabla 3-3:</b>	Expedición y recibo de licencias de excavación 2016-2019. ....	47
<b>Tabla 3-4:</b>	Factores que causan fallas en excavaciones. ....	48
<b>Tabla 6-1:</b>	Parámetros del perfil geotécnico. ....	70
<b>Tabla 6-2:</b>	Estadísticas de las variables geotécnicas. ....	73
<b>Tabla 7-1:</b>	Análisis geotécnico para los escenarios de peligro. ....	79
<b>Tabla 7-2:</b>	Escenarios modelados para el análisis. ....	80
<b>Tabla 7-3:</b>	Factores de seguridad de los escenarios modelados ....	81
<b>Tabla 7-4:</b>	Probabilidad de falla de los escenarios modelados. ....	86
<b>Tabla 7-5:</b>	Etapas constructivas consideradas en los modelos de Plaxis. ....	90
<b>Tabla 7-6:</b>	Desplazamientos totales en los modelos analizados (m). ....	91
<b>Tabla 7-7:</b>	Relación entre robustez y desplazamientos de la excavación. ....	96
<b>Tabla 7-8:</b>	Determinación del sistema difuso para el parámetro de robustez. ....	96
<b>Tabla 7-9:</b>	Reglas para el parámetro de robustez. ....	99
<b>Tabla 7-10:</b>	Comparativa de Niveles de servicio de las vías. ....	104
<b>Tabla 7-11:</b>	Relación conjuntos difusos de redundancia y nivel de servicio ....	106
<b>Tabla 7-12:</b>	Descripción de la categoría de las redes de servicios públicos. ....	108
<b>Tabla 7-13:</b>	Relación entre Redundancia y categoría de las redes. ....	109
<b>Tabla 7-14:</b>	Relación entre robustez y los desplazamientos en el entorno. ....	110
<b>Tabla 7-15:</b>	Determinación del sistema difuso para el parámetro de Redundancia. ....	111
<b>Tabla 7-16:</b>	Reglas para el parámetro de Redundancia. ....	113
<b>Tabla 7-17:</b>	Plan de control de monitoreo típico para una excavación. ....	116
<b>Tabla 7-18:</b>	Niveles de control y monitoreo en una excavación. ....	117

<b>Tabla 7-19:</b>	Relación de Redundancia con el nivel de monitoreo en la excavación. ....	118
<b>Tabla 7-20:</b>	Niveles en Políticas de gestión de una excavación. ....	121
<b>Tabla 7-21:</b>	Relación de Capacidad de gestión con las Políticas de gestión. ....	121
<b>Tabla 7-22:</b>	Relación entre criterios de caracterización socioeconómica. ....	123
<b>Tabla 7-23:</b>	Relación capacidad de gestión y caracterización socioeconómica. ....	124
<b>Tabla 7-24:</b>	Sistema difuso para el parámetro capacidad de gestión. ....	125
<b>Tabla 7-25:</b>	Reglas para el parámetro de capacidad de gestión. ....	127
<b>Tabla 7-26:</b>	Relación entre el nivel de intervención y nivel de daño. ....	129
<b>Tabla 7-27:</b>	Niveles de recuperación según escenarios de respuesta. ....	130
<b>Tabla 7-28:</b>	Relación entre criterios de Recuperación. ....	131
<b>Tabla 7-29:</b>	Determinación del sistema difuso para el parámetro de recuperación. ....	131
<b>Tabla 7-30:</b>	Reglas para el parámetro de Recuperación. ....	133
<b>Tabla 8-1:</b>	Valoración de criterios y parámetro de robustez en t1. ....	138
<b>Tabla 8-2:</b>	Valoración de criterios y parámetro de Redundancia en t1. ....	145
<b>Tabla 8-3:</b>	Valoración de criterios y parámetro Capacidad de gestión en t1. ....	151
<b>Tabla 8-4:</b>	Valoración de criterios y parámetro de Recuperación en t1. ....	152
<b>Tabla 8-5:</b>	Valoración de criterios y parámetro de robustez en t2. ....	155
<b>Tabla 8-6:</b>	Desvíos del Plan de Manejo de Tránsito por Emergencia Carrera 11. ....	157
<b>Tabla 8-7:</b>	Valores asignados a los criterios para la Redundancia en t2. ....	166
<b>Tabla 8-8:</b>	Valoración de criterios y parámetro Capacidad de Gestión t2. ....	168
<b>Tabla 8-9:</b>	Valoración de criterios y parámetro de Recuperación t2. ....	169
<b>Tabla 9-1:</b>	Resumen de los valores de los parámetros de Resiliencia. ....	171
<b>Tabla 9-2:</b>	Calculo de Resiliencia para Orness entre 0 y 1 previo al evento. ....	172
<b>Tabla 9-3:</b>	Calculo de Resiliencia para Orness entre 0 y 1 después del evento. ....	173
<b>Tabla 9-4:</b>	Índice de Resiliencia del sistema de excavación. ....	178

# Introducción

El concepto de resiliencia ha tenido un papel importante como parte de la gestión del riesgo en los sistemas de infraestructura, la necesidad de determinar la adaptabilidad frente a un evento disruptivo de un sistema ha llevado a que se planteen diversas metodologías para determinar un valor cuantitativo de resiliencia. A todos los sistemas sin excepción, se les podría calcular un índice de resiliencia, pero la determinación de las partes que la componen y en qué medida aportan a este indicador, sugiere un análisis profundo sobre las metodologías aplicadas actualmente, se deja a criterio de los evaluadores, que en algunas ocasiones tienen juicios sesgado y esto genera imprecisión e incertidumbre.

La resiliencia en infraestructura se ha definido con dos conceptos importantes, la resistencia a la perturbación, que puede ser representada por el parámetro de robustez, y la Capacidad de recuperarse, representada por la velocidad de recuperación. Basado en esto, los estudios sobre la resiliencia en infraestructura se dividen en dos grandes ramas, los métodos de evaluación cualitativa y cuantitativa para evaluar la resistencia, y las estrategias para mejorar la resiliencia en términos de recuperación (Lu et al., 2020a).

Entre los estudios sobre la resiliencia ante eventos se consideran los terremotos, huracanes, inundaciones e incendios. Los campos de investigación incluyen la ingeniería, la sociedad y la economía, y los niveles de estudio abarcan la ciudad, la comunidad, el subsistema y la infraestructura civil (Zhishen Wu et al., 2020a), sin embargo, no se encuentran grandes avances en la evaluación de la resiliencia en casos donde el factor detonante son las intervenciones antrópicas. En la investigación bibliográfica correspondiente sobre la determinación y evolución de los parámetros de resiliencia es muy poco abordado, así como las aplicaciones de ingeniería geotécnica con casos de estudio de aplicación. El cálculo de la resiliencia tiene dos principales retos, el primero es la definición de las características que componen los cuatro parámetros de resiliencia que son robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación (4Rs) para cada

estructura o sistema analizado; el segundo reto consiste en una adecuada agregación de los cuatro parámetros, ya que generalmente la resiliencia se calcula en dos momentos, el primero es en condiciones normales de funcionamiento, puede ser en etapa de planeación o diseño y el segundo que corresponde a un momento previo de un evento disruptivo que genere una pérdida total o parcial de funcionalidad del sistema.

Se considera que para la ingeniería geotécnica este estudio puede tener un aporte en los conceptos y metodologías que involucran la resiliencia; es un acercamiento para entender de que trata y que puede aportar a la gestión del riesgo y en algún momento llegar a la etapa de integración desde el diseño. También puede aportar como marco teórico para el cálculo del índice de resiliencia de sistemas conformados por edificaciones construidas y la infraestructura de interés como vías, redes de servicios y demás elementos del entorno que conformen el sistema, y en algunos casos en el estudio después de un estado de falla. Establecer el índice de resiliencia de excavaciones podría ampliar el panorama general en la gestión de riesgos en infraestructuras de este tipo teniendo en cuenta la interacción de la excavación en ambientes urbanos con la demás infraestructura del entorno; el entendimiento de cómo se comporta el sistema bajo los parámetros resilientes podría dar una aproximación de cuál de ellos tiene una relevancia que deba ser tomada en consideración en procesos de gestión.

El principal objetivo es determinar el índice de resiliencia y la función de desempeño de una excavación hecha para los sótanos del edificio Green Office en la ciudad de Bogotá, por medio de análisis retrospectivos que incluyen las etapas constructivas para el cálculo de los factores de seguridad y la probabilidad de falla. Se busca determinar los criterios que influyen en la redundancia, robustez, capacidad de gestión y de recuperación de un sistema compuesto por la excavación y el entorno teniendo en cuenta que se encuentra implantada en una zona urbana.

La propuesta metodológica usada para la evaluación de la resiliencia en excavaciones se centra en la revisión bibliográfica, donde se profundiza en las definiciones de la resiliencia y su campo de acción con el fin de aplicarlos a sistema de infraestructura geotécnica, específicamente en una excavación en entorno urbano, y aplicarlo en un caso de estudio

---

en la ciudad de Bogotá donde la construcción de una excavación para sótanos tuvo una falla de fondo afectando las condiciones del espacio público alrededor. Como parte de ello se definen los criterios que componen cada parámetro de resiliencia de acuerdo a las definiciones en el campo de la geotecnia, una vez definidos estos componentes, se identificó la necesidad de aplicar una metodología de agregación que no esté sujeta a ponderaciones por parte de los evaluadores, llegando a la aplicación de la lógica difusa para el cálculo de cada parámetro resiliente, por tanto, para cada criterio se constituyó el modelo de lógica difusa describiendo las Variables lingüísticas, el Universo de discurso, los Términos lingüísticos y las Funciones de membresía para cada variable de entrada y salida, posteriormente se establecen las reglas de implicación, que consolidan el modelo de conocimiento requerido, esto se desarrolla con el uso de la herramienta de cómputo numérico MATLAB, la cual dentro de sus funcionalidades cuenta con el módulo llamado Fuzzy Logic Toolbox™, el cual permite la simulación y análisis del modelo de lógica difusa.

Por otra parte, para la agregación de los parámetros de resiliencia se consideró llevar a cabo un análisis con operadores tipo OWA (Ordered Weighted Averaging) por sus siglas en Inglés, que permite la agregación de los parámetros de resiliencia aplicando la actitud frente al riesgo del evaluador y obtener una valoración de tipo optimista, pesimista o neutra a partir de un coeficiente de orness ( $\alpha$ ), en este trabajo se ha calculado la resiliencia con todos los valores de orness obteniendo una gráfica con todos los posibles valores de resiliencia como herramienta de comparación. Finalmente, con la metodología establecida para los cálculos tanto de parámetros como de resiliencia, se evalúan las condiciones particulares del caso de estudio y se determina los cambios de resiliencia en el tiempo previo y posterior al evento disruptivo con pérdida de funcionalidad de la excavación como del entorno.

El presente trabajo final de maestría se compone de 10 capítulos de la siguiente manera:

Capítulo 1 - Objetivos: Se presenta de manera detallada el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo final de maestría.

Capítulo 2 - Justificación: Se describe la importancia del tema estudiado y la relación con la gestión del riesgo, algunos avances, ventajas y desventajas.

Capítulo 3 – Marco Conceptual: Se resumen los principales conceptos de resiliencia, avances en la evaluación, se describen algunas metodologías de análisis en el campo de

la geotecnia. Se incluyen los conceptos de gestión del riesgo, resiliencia en infraestructura. Se presenta información correspondiente a la finalidad de las excavaciones y las principales causas de falla. Adicionalmente se introducen los conceptos de lógica difusa y operadores OWA.

Capítulo 4 – Marco metodológico para la evaluación de resiliencia en excavaciones: Se describen los pasos propuestos para cada uno de los análisis de criterios, parámetros y cálculos de resiliencia en excavaciones en entornos urbanos.

Capítulo 5 - Caso de estudio Edificio Green Office: Se presenta un resumen del proyecto, sus características, localización y las particularidades del evento y las posibles causas de falla.

Capítulo 6 – Análisis de la excavación: Se analizan las características dimensionales de la excavación con base en la información recopilada del caso de estudio. Se describen las consideraciones de los modelos de análisis de equilibrio límite y de deformaciones.

Capítulo 7 - Definición de parámetros de resiliencia de la excavación: Se describen los criterios considerados que permiten un acercamiento de medición para la robustez, redundancia, capacidad de gestión, y recuperación del sistema conformado por la excavación y su entorno. También se encuentran las condiciones de los sistemas de lógica difusa que permiten la evaluación de los criterios y el cálculo de los parámetros.

Capítulo 8 – Cálculo de parámetros resilientes para el caso de estudio: se amplía información del estudio de caso donde se tiene en consideración las particularidades de los reportes hechos por la Universidad Nacional de Colombia y las entidades de control y vigilancia distritales para la atención de la emergencia. Con esto se valoran los criterios y se calculan los parámetros resilientes del sistema de excavación estudiado.

Capítulo 9 – Cálculo de Resiliencia: Se presenta la metodología de cálculo de la resiliencia por medio del operador OWA, adicionalmente describe el índice de resiliencia y la función de desempeño del sistema, analizando los factores que intervienen en los resultados obtenidos.

Capítulo 10 - Conclusiones y recomendaciones: De los resultados expuestos en los numerales 8 y 9, se concluye de acuerdo con el alcance del trabajo.



# 1. Objetivos

## 1.1 Objetivo general

Determinar el índice de resiliencia y la función de desempeño de la excavación hecha para el edificio Green Office en la ciudad de Bogotá con la definición de criterios y parámetros de resiliencia en excavaciones profundas.

## 1.2 Objetivos específicos

- Analizar de manera retrospectiva la excavación incluyendo las fases constructivas por medio de una simulación de elementos finitos para conocer la probabilidad de falla del sistema.
- Determinar los criterios de resiliencia redundancia, robustez, capacidad de gestión y de recuperación y la ponderación de estos para todo el sistema de la excavación.
- Desarrollar una metodología de cálculo para la resiliencia en sistemas de excavación profunda con sistemas de cómputo de aprendizaje autónomo.
- Estimar la función de desempeño en diferentes momentos en la línea de tiempo del caso en mención.

## 2. Justificación

La gestión del riesgo se ha convertido en un aspecto fundamental en la agenda pública de todo gobierno, debido a que los efectos per se del cambio climático han desencadenado el aumento significativo de catástrofes de índole natural, agrandando las ocasionadas ya con la actividad desmedida de los seres humanos (Rasper, 2016a; Tierney & Bruneau, 2007a). Sin embargo, las amenazas no provienen solo de fenómenos naturales, también la actividad antrópica como la construcción donde se afecta al medio ambiente y se altera la normalidad de los sistemas en funcionamiento (Basu et al., 2015), llegando a ser fuente de desastres cuando no se han tomado las medidas preventivas o mitigadoras desde el diseño para prevenir o reducir los daños, cuando estos son inevitables (Copyright et al., 2007)(Weikert Bicalho, 2019a).

Conservar la integridad de las obras de infraestructura es actualmente un objetivo fundamental y a su vez promotor de investigación tanto por el sector público como el privado, debido al aumento en los esfuerzos y la sobre utilización de la infraestructura. Las consecuencias de los eventos extremos que se encuentran día a día en aumento, tanto en frecuencia como en magnitud causados por el cambio climático, generan graves impactos a la comunidad incrementando pérdidas de funcionalidad y continuidad de los servicios de infraestructura de mayor relevancia, como son los sistemas de transporte, energía, saneamiento y servicios de infraestructura social; esta situación se magnifica en las ciudades debido a que los sistemas están estrechamente conectado. Las interrupciones ocasionadas por eventos de tipo ambiental han crecido un 29% entre 2012 y 2019, y se cree deberán aumentar en el futuro (Internacional, n.d.).

---

Uno de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (AG-ONU) es “Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, **resilientes** y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.” (Weikert Bicalho, 2019b). Esta, entre otras metas de los ODS, están relacionadas con la reducción de vulnerabilidades, la respuesta a desastres y otros tipos de eventos disruptivos y la importancia de promover una infraestructura resiliente, (metas 1.5, 11.5 y 13.1) evidenciando que en la actualidad es imprescindible la promoción de la infraestructura resiliente como parte del desarrollo y de la calidad de vida de las poblaciones, garantizando que los servicios de infraestructura sean fiables y eficiente, ya que, los servicios de infraestructura poco confiables pueden tener efectos adversos sobre las comunidades, así como la operación de las cadenas de valor, reduciendo de productividad y la competitividad de la economía (Rogers et al., 2012a).

Uno sector pioneros en el análisis de vulnerabilidades de la infraestructura es el industrial, debido a que los servicios logísticos están basados en la funcionalidad de las redes de transporte y de otros servicios de infraestructura. El sector ha investigado las consecuencias económicas que pueden llegar a tener las cadenas de valor con capacidad de responder a eventos disruptivos, y que tienen la capacidad de reasignar recursos y adoptar estrategias alternativas frente a circunstancias adversas versus las que no lo tienen (Internacional, n.d.), en otras palabras se ha identificado que las cadenas de valor están adoptando los conceptos de **resiliencia** en infraestructura en la gestión del riesgo del sector industrial, con el fin de demostrar que las cadenas de valor resilientes presentan una ventaja competitiva al momento de tomar decisiones de inversión a gran escala (Internacional, n.d.).

La gestión del riesgo se promueve en gran medida por la identificación de estas y más problemáticas que pueden ocasionar interrupción de la funcionalidad de los sistemas de cualquier tipo, por tanto, se considera que incluir el concepto de resiliencia en los análisis de vulnerabilidad y amenaza, permitirá a las entidades una mejor preparación en las medidas de mitigación, contención y recuperación de acuerdo con el tipo de evento, que garanticen el funcionamiento adecuado de los sistemas considerados esenciales y evitar

al máximo el colapso total o parcial de la infraestructura (Sungay et al., 2012a; Wied et al., 2020a).

A pesar del aumento en el interés de la resiliencia en varios escenarios donde se considera la infraestructura como parte fundamental del desarrollo de las comunidades, según Hallegatte, Rentschler y Rozenberg (2019)(Francis & Bekera, 2014a), la resiliencia no ha sido un factor influyente en las decisiones de inversión en infraestructura, debido a que los costos de la “no resiliencia” no son tenidos en cuenta ya sea por la subestimación de los riesgos o por las múltiples dificultades asociadas a su estimación; por otra parte un estudio del National Institute of Building Sciences de los Estados Unidos (Multi-Hazard Mitigation Council, 2019), destaca que cada dólar invertido en la construcción de infraestructura resiliente podría implicar un ahorro de hasta 13 dólares en costos futuros. Esto denota que todas las investigaciones y propuestas por entender los diferentes aspectos que constituyen la resiliencia tienen cada vez más importancia en el conocimiento del riesgo, las medidas para prevenirlo y/o mitigarlo.

En la actualidad, las discusiones de diferentes sectores son entorno a la continuidad de los servicios de infraestructura frente a eventos extremos y sus diferentes combinaciones de peligro (como huracanes, deslizamientos, tormentas, etc) que impactan los sistemas de transporte, energía, viviendas y otras infraestructuras que afecta de manera directa a las comunidades. Por ejemplo, las Naciones Unidas considera que en América Latina y el Caribe existen motivos adicionales frente a otros países para que la gestión del riesgo y los diferentes instrumentos para la reducción de los impactos del cambio climático en la infraestructura, así como con la capacidad de respuesta y recuperación frente a peligros y amenazas de otra índole como la antrópica, sean considerados en las agendas gubernamentales, ya que los problemas que afectan la región, están relacionados con los obstáculos al desarrollo futuro (Weikert Bicalho, 2019a).

La infraestructura influye directamente en la exposición, susceptibilidad y la capacidad adaptativa de otros sistemas y determina por tanto, el estado después de la ocurrencia de un evento disruptivo (Internacional, n.d.), entonces es apropiado decir que la infraestructura geotécnica juega un papel fundamental en esta capacidad adaptativa, pues

---

todas las estructuras del índole que sean, están soportada por estructuras geotécnicas que si fallan constituyen una afectación de la infraestructura critica que son vulnerables por efectos de reacción en cadena, ya que pueden multiplicar los riesgos y propagar el desastre, haciendo más complejas las actividades de respuesta (Zobel & Khansa, 2014). En consecuencia, la resiliencia en la ingeniería geotécnica puede influir significativamente en la sostenibilidad del desarrollo de infraestructura debido a su posición temprana en el proceso de construcción (Das et al., 2018).

Teniendo en cuenta lo expuesto, se considera que la resiliencia, es una característica que puede ser aplicada y estudiada al nivel de infraestructura, ya que como se presentara en los siguientes capítulos, los parámetros propuestos para su estimación están relacionados con las amenazas, la vulnerabilidad, la capacidad de gestión y recuperación que pueda tener una estructura y su entorno. Por lo tanto, se considera que estimar un índice de resiliencia permite determinar los niveles de estabilidad, identificar las características y capacidades de recuperación de un sistema frente a diferentes eventos, ya sean naturales o antrópicos. La resiliencia también ayuda a identificar las falencias del sistema, para posteriormente proponer las acciones adecuadas para la reducción de vulnerabilidad, lo que se constituye como el fin último de la gestión del riesgo. Esto enfocado en la seguridad de las estructuras geotécnicas que tiene una influencia significativa en las estructuras de ingeniería a gran escala. La ingeniería geotécnica está siendo reconocida como uno de los campos de construcción de alto riesgo, ya que a menudo se enfrenta a elevados riesgos derivados de las complejas condiciones geológicas e hidrogeológicas.

En este trabajo se estudia la forma de incluir el término de resiliencia en los sistemas de infraestructura geotécnica, desde un abordaje integrado con la gestión del riesgo para que a futuro se adopten los criterios de resiliencia que permitan garantizar la construcción de nueva infraestructura resiliente, teniendo en cuenta que los centros urbanos tienen una mayor densidad y complejidad en la interconectividad de la infraestructura critica, que para el aprovechamiento del espacio se hacen a nivel subterráneo, existe una mayor relación entre estas, haciendo de las ciudades centros vulnerables a los eventos disruptivos debido a la dependencia de la población del funcionamiento e integridad de dichos servicios vitales como se presenta más adelante en el caso de estudio (Rasper, 2016b; Weikert Bicalho, 2021a).

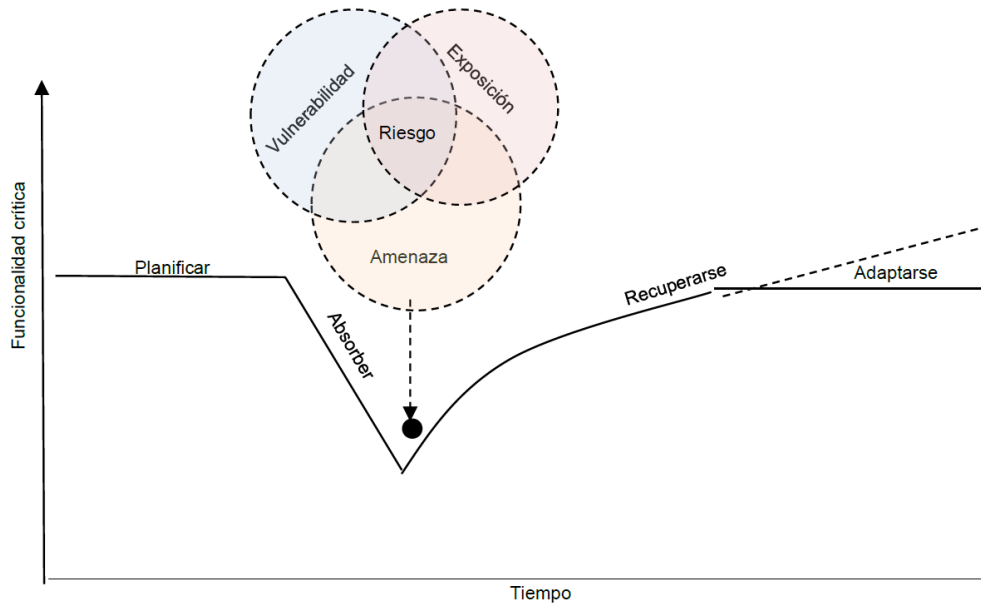
Entre más información y desarrollo de conceptos y criterios de resiliencia desde la práctica, aplicados de manera analítica y cuantitativa, se tendrán mayores herramientas para la inclusión de la resiliencia en la infraestructura, ya que esto puede aumentar la capacidad de absorción ante eventos de dicha infraestructura, disminuyendo la magnitud de las catástrofes que en alguna medida se pueden evitar [11]. Es claro que no es posible diseñar estructuras o sistemas que resistan todas las condiciones de amenaza (Basu et al., 2015), sin embargo, aplicando los criterios de la resiliencia (redundancia, robustez, rapidez y recuperación) en la etapa de diseño se puede llegar a sistemas que sean capaces no solo de soportar los eventos minimizando las consecuencias, también de recuperar su funcionalidad en menor tiempo, todo esto teniendo en cuenta que la resiliencia siempre será una característica intrínseca de cada sistema (Mc Carthy et al., 2007a); esto en contraste del enfoque tradicional de la diseño a “prueba de fallas” el diseño enfocado en la resiliencia puede considerarse como un enfoque "seguro para fallar" en el que se espera que los sistemas fallen bajo factores estresantes inesperados (Das et al., 2018, 2019).

Como caso de estudio se ha seleccionado una excavación profunda para la aproximación del índice de resiliencia, debido a la interconexión de la obra con el entorno circundante con infraestructura de interés comunitario como son las vías, redes de servicios públicos básicos como el acueducto y el alcantarillado. Aquí el cálculo de resiliencia va enfocado a analizar la evolución de los estados de esfuerzos, el análisis de deformaciones y otros factores que definen la estabilidad del sistema, entendiendo que el evento disruptivo se presenta en la excavación cuando se excede uno de los dos estados límites, ya sea el estado límite último por medio del análisis de la probabilidad de falla o el estado límite de servicio que se excede cuando las deformaciones superan en gran medida las aceptadas haciendo que la función de desempeño del sistema que conforma la excavación caiga abruptamente. Bajo estas condiciones se evalúa que tan resiliente es el sistema y el entorno asociado con ayuda de análisis retrospectivos.

### 3. Marco Conceptual

En la actualidad el análisis de resiliencia de un sistema se diferencia de una evaluación de riesgo debido a que, en el segundo, se identifican las consecuencias negativas (vulnerabilidad) de posibles eventos no deseados (amenaza), con el fin de mitigar la exposición del sistema a esos resultados indeseables, por su parte el análisis de resiliencia considera que el sistema debe dotarse de elementos capaces de (i) planificar o anticipar y absorber posibles interrupciones; ii) desarrollar medios para adaptarse a los cambios dentro o alrededor del sistema; y (iii) establecer mecanismos de respuestas dirigidos recuperarse lo más rápido posible después de un impacto o evento disruptivo y hasta llegar a la adaptación completa del sistema. La Figura 3-1 muestra en la gráfica de funcionalidad del sistema a través del tiempo (la cual será explicada más adelante) las diferencias entre los dos análisis, mostrando también la complementación ya que como se expresa en el informe de comercio internacional de las Naciones Unidas (Lee, 2016a) “se puede inferir que conceptos como riesgo, peligro (o amenaza), vulnerabilidad, y de capacidades como las de recuperación, adaptación y absorción de los impactos de un peligro son parte importante del cuadro analítico que compone los análisis de resiliencia. De hecho, es imposible analizar la resiliencia de un sistema sin considerar los riesgos a qué está expuesto”.

**Figura 3-1:** Representación teórica de la resiliencia basada en el análisis de riesgo



Fuente: Tomado de (Weikert Bicalho, 2021b)

Por lo tanto, se puede concluir que el análisis de resiliencia es un complemento del análisis de riesgos, mejorando las herramientas usadas hasta ahora en la gestión del riesgo.

La resiliencia es por sí un concepto que no ha sido aplicado del todo en la gestión del riesgo, la aplicación a la infraestructura es más acotada, entonces su aplicación en la geotecnia es poco estudiada, por lo que este trabajo se considera como un aporte en las posibles medidas de la resiliencia, ya que si bien el concepto puede ser concebido de manera cualitativa, la ingeniería demanda que se aplique un marco cuantitativo que garantice en alguna medida la aplicación a múltiples sistemas geotécnicos y que permitan identificar el estado o condición de resiliencia de los sistemas bajo eventos disruptivos.

### 3.1 Conceptos de resiliencia

El concepto nació principalmente en el área de la ecología, Holling (1973) definió como sistemas resilientes a los ecosistemas que se mantienen y persisten frente a perturbaciones y cambios en su estado natural. Las condiciones de un sistema complejo



---

no equilibrado e inestable, se transforma al mismo tiempo para presentar otro comportamiento reorganizado (Wied et al., 2020b).

En el área de la Psicología, la resiliencia se considera como la capacidad de adaptación del comportamiento de los seres humanos en circunstancias desafiantes o amenazantes. El concepto se aplica ampliamente en el desarrollo infantil, y la resiliencia psicológica se describe en términos de estados internos de bienestar. Al igual que la resiliencia social, la resiliencia psicológica se refiere a la capacidad de resistir y recuperarse de un trauma, tragedia, amenaza, o fuentes de tensión significativas, como problemas familiares o de relaciones personales, problemas serios de salud o situaciones estresantes del trabajo o financieras” (Wied et al., 2020b)

En el área Social y económica, se aplica a grupos sociales, individuos, y comunidades, para examinar su respuesta ante las crisis, como los cambios sociales, económicos o medioambientales, tensiones sociales que pueden incluir la violencia política, la crisis económica y los cambios en el entorno físico (Wied et al., 2020c). Los individuos o los grupos se ven obligados a adaptarse a las nuevas condiciones, y la respuesta positiva a esos cambios es la resiliencia social o la resiliencia de la comunidad. En esta categoría se incluye también el impacto social y económico en grupos sociales de la comunidad frente a un desastre natural, esta visión es más geográfica, por lo tanto, se establece una resiliencia local frente a las catástrofes (Tierney & Bruneau, 2007b).

En cuanto a Ingeniería, en 1984 Pimm define la resiliencia como “el tiempo que tarda un sistema en regresar a un estado previo al disturbio”, es decir, la rapidez con la que una variable desplazada desde el equilibrio retorna al mismo (Lee, 2016b). En resumen, se tienen dos medidas, la solidez (Robustez + Redundancia) frente a perturbaciones o eventos y la velocidad de recuperación cerca del equilibrio.

Como se puede notar, en su mayoría los conceptos establecen el **estado** de un sistema **después de un evento**, un estado en termino de bienestar o en términos de equilibrio, y dependiendo de la disciplina se incluyen parámetros como tiempos de recuperación, gestión de la emergencia, disponibilidad de recursos, entre otras medidas que permiten establecer un *Índice de Resiliencia* del sistema estudiado (NIAC, 2009a), esto es acorde al concepto que desde la gestión del riesgo se ha ido implementando.

En este caso en particular, el interés está en el concepto más apropiado en el ámbito de la infraestructura; el National Infrastructure Advisory Council (Mc Carthy et al., 2007b), define la resiliencia como “la capacidad de un sistema para soportar interrupciones, seguir funcionando y recuperarse rápidamente de las mismas, adaptándose a ellas”. Este concepto abarca más allá de un estado de equilibrio y una medida en el tiempo de recuperación, implica también la gestión de los recursos, antes, durante y después, y es en este punto en que la resiliencia se implementa para establecer y medir la gestión del riesgo ya sea en una comunidad, en un proyecto social, o en la infraestructura.

Como ya se ha presentado, en un sistema resiliente se puede medir la capacidad de tener menor probabilidad de sufrir daños o de fallar a causa de las interrupciones. Enmarcando el concepto desde la infraestructura, uno de los pasos para alcanzar infraestructura resiliente es aumentar la capacidad de absorber los daños sin que se produzca un fallo total o catastrófico, con consecuencias sociales y económicas; haciendo que la recuperación de la función de una estructura a partir de un estado de perturbación pueda lograrse de manera rápida, mejorando la capacidad de adaptación (Lee, 2016b).

Para la resiliencia en la ingeniería civil los conceptos se basan en el mismo orden; se tiene la **preparación** y la **respuesta** de una estructura frente a sucesos perturbadores. La preparación se asocia sobre todo a la capacidad de mitigar los efectos de los sucesos perturbadores mediante la disposición de recursos adecuados y la elaboración de estrategias antes de la perturbación (Rogers et al., 2012a). En cuanto a la respuesta, se deben evaluar dos tipos, **la absorción** y **la recuperación**, tras el suceso disruptivo la absorción es la respuesta inmediata de un sistema de infraestructuras en la que el sistema o algunos de sus elementos soporta la perturbación (Robustez), y la recuperación son los esfuerzos organizativos para reparar rápidamente el sistema dañado y los efectos consiguientes que se propagan a otros sistemas (Francis & Bekera, 2014a).

**Figura 3-2:** Fases de la resiliencia en infraestructura.

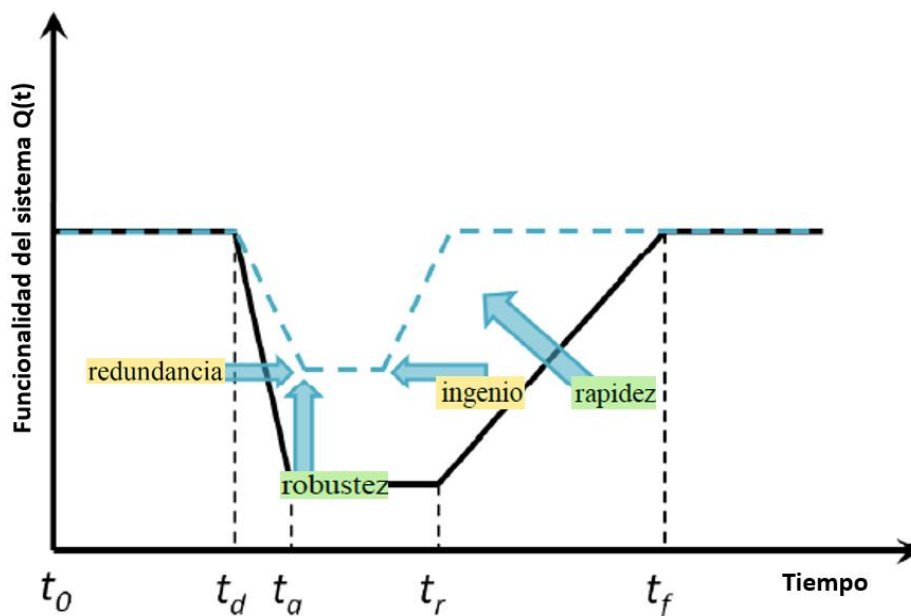


Fuente: Elaboración propia

La resiliencia en sistemas de infraestructura se ha desarrollado basándose en la medición de funcionalidad del sistema desde el momento de la interrupción hasta el momento de recuperación. Esta metodología se representa gráficamente relacionando la funcionalidad del sistema a través del tiempo (Figura 3-4), aquí establece una línea base de funcionalidad en un tiempo cero  $t_0$  que inmediatamente al momento de presentarse el evento causa una disminución de funcionalidad mostrando una línea de pendiente negativa en la gráfica desde el momento  $t_d$  hasta  $t_a$  debida a la absorción de los impactos. Los esfuerzos de recuperación pueden iniciarse inmediatamente después del evento; sin embargo, la funcionalidad del sistema puede permanecer constante durante un periodo de tiempo desde  $t_a$  hasta  $t_r$  donde se organizan las estrategias de respuesta y se reúnen los recursos necesarios para la recuperación de la funcionalidad, a esto se le conoce como etapa de evaluación. Una vez se empiecen a aplicar las medidas estimadas en la etapa de evaluación, se espera que la funcionalidad del sistema se recupere hasta un nivel aceptable para su funcionamiento normal desde el tiempo  $t_r$  hasta  $t_f$  en la gráfica (Alegría, 2021a; Koren et al., 2018a).

En esta misma gráfica se pueden observar las propiedades de resiliencia que se encuentran dadas por los tiempos descritos anteriormente. La primera es la **robustez** del sistema o la estructura y se relaciona con la capacidad de soportar un conjunto de solicitudes o demandas sin sufrir una pérdida de funcionalidad total. La robustez se evidencia en la fase de **absorción**, cuanto mayor sea la robustez del sistema, menor es la probabilidad de que el daño se propague y se produzcan consecuencias graves por ende mayor absorción. La segunda propiedad es la **redundancia** que se refiere hasta qué punto los elementos son sustituibles, si el sistema cuenta con cierto grado de redundancia se puede reducir las consecuencias del evento en la funcionalidad (Koren et al., 2018b; Wied et al., 2020c), estas dos primeras propiedades trabajan en conjunto para que la primera línea de pendiente negativa sea menor. La tercera propiedad es la **capacidad de gestión** que se aplica en la etapa de evaluación, esta puede reducir el tiempo de evaluación y puede desarrollar medidas efectivas de mitigación y al proceso de recuperación. Y la cuarta es la **recuperación**, y se refiere al tiempo que tarda el sistema en volver al equilibrio una vez se tengan las medidas de la etapa anterior, en otras palabras, es la capacidad que tiene el sistema de realizar las medidas de mitigación y recuperación en el tiempo objetivo o uno menor y evitar futuras perturbaciones. En esta propiedad se puede medir también la capacidad de identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos (monetarios, físicos, tecnológicos e informativos), durante la fase de evaluación  $t_a$  a  $t_r$  (Lee, 2016b). Al igual que las dos primeras propiedades estas trabajan en conjunto para reducir el tiempo de evaluación e implementación de las medidas para la recuperación total del sistema hasta el tiempo  $t_r$ .

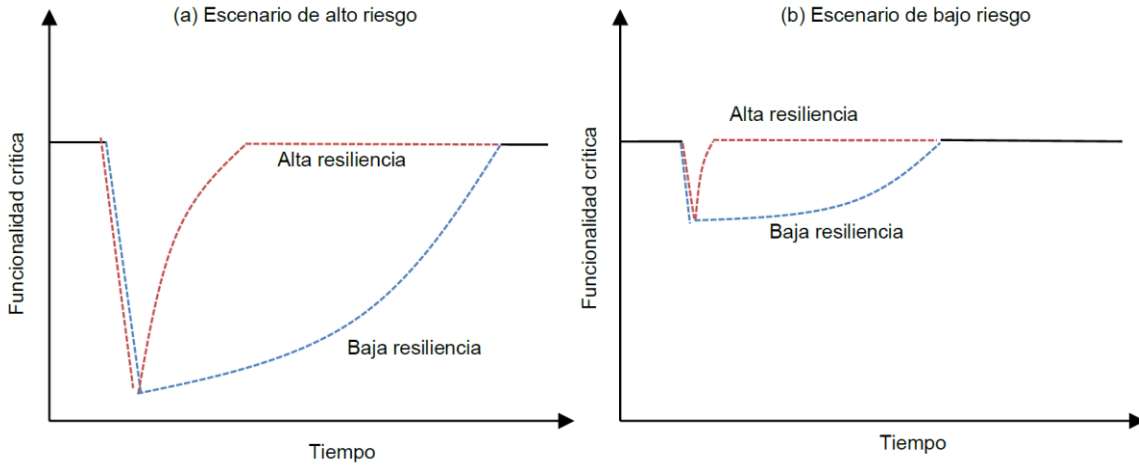
**Figura 3-3:** Pérdida típica de resiliencia a lo largo del tiempo



Fuente: Modificado de (Lee, 2016b)

Otros autores (Lu et al., 2020c; Mc Carthy et al., 2007a), han representado el desempeño de sistemas resilientes a través de la caída de funcionalidad en el tiempo reflejando el riesgo total en la magnitud de la caída tras la materialización del evento adverso, mientras que la resiliencia determina la forma de la curva de recuperación de la funcionalidad crítica como se representa en la Figura 3-4, por el área debajo de cada una de las curvas se puede observar que, para un mismo nivel de riesgo, sistemas más resilientes tienen mejor desempeño que los que presentan baja resiliencia. Además, sistemas sujetos a bajo riesgo no tienen, necesariamente, mejor desempeño que los sistemas altamente resilientes que estén sujetos a riesgos más altos (Francis & Bekera, 2014b; Lee, 2016a; Zhishen Wu et al., 2020b).

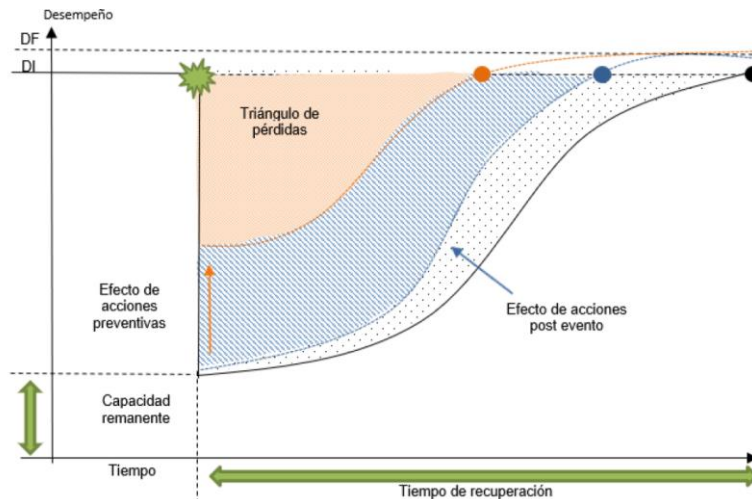
**Figura 3-4:** Representación teórica de la resiliencia de un sistema



Fuente: Tomado de (Weikert Bicalho, 2021a)

Se han convenido entonces, que el comportamiento del sistema de infraestructura hipotético tras la materialización de un evento disruptivo puede tener una mejora por el efecto de las acciones preventivas, reduciendo lo que en la gráfica de funcionalidad en el tiempo se conoce como “Triángulo de pérdidas”. En la Figura 3-5, se puede ver también como las acciones después del evento aceleran la recuperación reduciendo el tiempo de recuperación en el desempeño del sistema después de un evento disruptivo.

**Figura 3-5:** Comportamiento de un sistema tras un evento disruptivo.



Fuente: Tomado de (Weikert Bicalho, 2021a)

## 3.2 Resiliencia en infraestructura e índice de resiliencia

La resiliencia se ha abierto paso en muchas disciplinas como un concepto estimulante y a pesar de nacer de otras disciplinas como la biología, en la actualidad se aplica a disciplinas que tienen como objeto de investigación sistemas sociotécnicos, pero también sistemas puramente técnicos de diversas escalas (Orwin & Wardle, 2004). En particular, la ingeniería y las ciencias técnicas que investigan los sistemas de infraestructuras críticas y los subsistemas relacionados se ha adoptado el concepto de resiliencia para innovar en la investigación. A pesar de esto se necesita un enfoque conciso de la resiliencia desde el punto de vista técnico y de las ciencias naturales de lo sociotécnico que recoja suficientemente las perspectivas de la resiliencia (Lu et al., 2020a).

Para pensar en una infraestructura resiliente, se necesitan enfoques holísticos que permitan mitigar los peligros naturales y de origen humano, además de desarrollarse esquemas de evaluación de la resiliencia para las estrategias multidimensionales de mitigación de peligros (Tierney & Bruneau, 2007b). Quizás el principal avance en la homogenización de definiciones y criterios para la infraestructura resiliente son los sistemas de rating de proyectos de infraestructura, estos sistemas constituyen un ejemplo importante de como el concepto de resiliencia puede ser enfocados en la sostenibilidad. Los sistemas rating son herramientas para la evaluación de infraestructuras con el fin de fomentar la sostenibilidad de las inversiones en infraestructura. La resiliencia es ahora uno de los criterios (o conjuntos de criterios) considerados en la evaluación de la sostenibilidad de la infraestructura.

“Envision” es un sistema de rating desarrollado por la Universidad de Harvard en un programa de Infraestructura Sostenible impartido por el Instituto de Infraestructura Sostenible (ISI) (Weikert Bicalho, 2021b). Envision tiene 64 indicadores en cinco categorías, en la categoría de resiliencia se revisa si el proyecto evaluado evitar el desarrollo inadecuado, se contempla la vulnerabilidad al cambio climático, se evalúa también el riesgo y la resiliencia, se establecen objetivos y estrategias de resiliencia, se maximiza la resiliencia, y existe una mejora en la integración de la infraestructura. Cada valor permite cuantificar *“la capacidad de la infraestructura de resistir a amenazas de corto plazo y de adaptarse a las de largo plazo, garantizando que su vida útil sea más larga y*

---

*que el proyecto sea capaz de atender plenamente a las necesidades de los usuarios” (ISI, 2018). Sin duda este rating contribuye a la unificación de criterios de resiliencia, mejoran la infraestructura, y promueven el desarrollo sostenible (Basu et al., 2015; Internacional, n.d.).*

Como se mencionó anteriormente para evaluar la resiliencia de algo, en este caso la infraestructura, se deben identificar las posibles amenazas, en este sentido el Rogers y otros autores, establecieron ocho categorías de amenaza para la infraestructura puede contrarrestar con la aplicación de la Resiliencia, entre ellas se encuentran el deterioro gradual por envejecimiento, daños ocasionados por las cargas superficiales o el alivio de esfuerzos debidas a intervenciones de corte (como se presenta en las excavaciones), demandas del servicio cambiantes y con tendencia al aumento, terrorismo, efectos del cambio climático, efectos por el aumento de la población, peligros naturales severos como aumento de precipitación, deslizamientos, terremotos; entre otros (Basu et al., 2015). Además de estas categorías, hicieron la distinción entre Resiliencia y Resistencia, donde, la resistencia se relaciona con desde el diseño y las características de la infraestructura para la prevención y protección del sistema frente a fallas, mientras que la Resiliencia es desarrollada como respuesta y recuperación después de que un evento disruptivo reduce la funcionalidad del sistema (Basu et al., 2015).

En (Francis & Bekera, 2014a) se define como infraestructura resiliente aquella que contempla cuatro características, anticipación, absorción, adaptación y recuperación, lo que conlleva a una infraestructura capaz de reducir la magnitud de un evento y reducir el tiempo de recuperación. Se considera que, con una estrategia de gestión adaptativa, un sistema de ingeniería está mejor equipado para manejar los cambios en las demandas a lo largo del tiempo y, por lo tanto, es más eficiente. En ingeniería, Basu & Lee (Lee, 2016b) proponen que la resiliencia sea calculada por el cambio en el rendimiento y/o desempeño de la estructura en un tiempo determinado (Ecuación 4.1) definida como la integral de una función de desempeño conocida  $Q(t)$  con respecto al tiempo, siendo los intervalos límites, el momento en el que se produce la interrupción en el sistema ( $t_d$ ) y un momento de inspección determinado ( $dt$ ).



$$R = \frac{1}{t_h} \int_{t_d}^{t_d+t_h} Q(t) dt \quad (4.1)$$

Esta representa el área bajo la curva formada por la pérdida de funcionalidad y el comportamiento de la recuperación del sistema en términos de la resiliencia a lo largo del tiempo.

### 3.3 Evaluación de la resiliencia

El concepto de resiliencia se puede aplicar en diferentes escalas de riesgo y componentes de un sistema, como individuos, domicilios, comunidades, instituciones, e incluso a los Estados. Por tanto, para su cuantificación, en todos los casos, se requiere identificar el sujeto, la resiliencia de qué o quién y el objeto del análisis, la resiliencia a qué; en otras palabras, es necesario determinar el sistema de análisis y el tipo de perturbación a la que está expuesto y a cuyos efectos debe reaccionar (Weikert Bicalho, 2019a). A continuación, se presenta el contexto bajo el cual debe ser evaluado cualquier sistema al que se le quiera determinar la resiliencia.

**Figura 3-6:** Contexto de los sistemas en la evaluación de resiliencia.



Fuente: Tomado de (Weikert Bicalho, 2019b)

Varios autores (Ainuddin & Routray, 2012; Lu et al., 2020b; Tierney & Bruneau, 2007b) concuerdan en que la medición o cuantificación de la resiliencia de un sistema debe enfocarse en tres objetivos que a su vez se asocian y complementan entre sí: la reducción de probabilidades de falla; la reducción de las consecuencias de las fallas (en términos de vidas perdidas, daños y consecuencias sociales y económicas adversas); y la reducción del tiempo de recuperación de la funcionalidad “normal” del sistema. En consecuencia, Bruneau et al. propusieron un marco para evaluar cuantitativamente la resiliencia en el ámbito de la ingeniería sísmica con cuatro características (4R) robustez, redundancia, ingenio (capacidad de gestión) y rapidez (recuperación), y cuatro dimensiones, técnica, organizativa, económica y social (Tierney & Bruneau, 2007b). Posteriormente, Cimellaro et al. presentaron un marco para la cuantificación analítica de la resiliencia ante las catástrofes y un método matemático basado en la curva de funcionalidad del sistema. En concordancia, la cuantificación de la resiliencia en ingeniería civil se ha desarrollado en cuatro líneas de aplicación:

- Evaluación de la resiliencia para los sistemas de infraestructura, sociales y económicas de un sistema urbano.
- Medidas cuantitativas de la resiliencia en infraestructuras y redes de distribución.
- Medidas cuantitativas de la resiliencia en subsistemas de edificios.
- Análisis del estado límite de la resiliencia (Lu et al., 2020a).

Por tanto, para llegar a una correcta medición de los parámetros de resiliencia se debe determinar el marco de evaluación donde se priorice el aspecto ingenieril de la resiliencia que se establece como “la velocidad de recuperación del estado inicial”, con base en los aspectos de resiliencia mencionados (4R) estimando el cambio en ellos antes y después del evento (Ainuddin & Routray, 2012; Jazmin Natalia Pedreros Alba Nancy Viviana Roncancio Cabrejo, 2022a; Sungay et al., 2012b). Para establecer el marco es importante identificar los objetivos que se quieren alcanzar en dicha evaluación, algunos autores proponen a modo de referencia los siguientes objetivos, que para el marco de este trabajo son aplicables a las excavaciones en entornos urbanos:

- 
- Identificar los escenarios de peligro y cuantificar la respuesta de los sistemas en términos de su estado límite.
  - Determinar los posibles daños a causa de los escenarios de peligro y los impactos que tienen en la comunidad los daños en la infraestructura.
  - Evaluar cuantitativamente la resistencia del sistema (en este caso de la excavación) teniendo en cuenta:
    - Robustez.
    - Redundancia.
    - Capacidad de gestión.
    - Recuperación.
  - Evaluar la eficacia de las estrategias de respuesta implementadas para mejorar la resiliencia.

Teniendo en cuenta que se quieren evaluar dos estados de un mismo sistema, el cual es afectado por factores detonantes, se hace necesario implementar el esquema de evaluación de indicadores llamado FUERZA MOTRIZ-PRESIÓN-ESTADO-IMPACTO-RESPUESTA o por sus siglas en inglés DPSIR (Driving Forces-Pressures-State-Impacts-Respond) (European Environment Agency, 1999), que es una derivación de modelo de Presión-Estado-Respuesta que permite incluir el impacto de los cambios de estado, lo cual es concordante con lo que se busca evaluar con el índice de resiliencia.

En el marco DPSIR, se deben identificar los impulsores o fuerzas motrices que se crean para satisfacer necesidades humanas básicas, que generan presiones derivadas de las fuerzas motrices y repercuten en el sistema o el entorno ya sea natural o construido, cambiando el estado y sus condiciones. El cambio de condiciones genera unos impactos que influyen en el bienestar del sistema, lo cual hace que se genere una respuesta ante estos impactos, ya sea de adaptación, recuperación o compensación (European Environment Agency, 1999).

A continuación, se relaciona el marco DPSIR con los objetivos del marco de evaluación de la resiliencia (Tabla 3-1).

**Tabla 3-1:** Marco DPSIR para la evaluación de resiliencia.

MARCO DPSIR	RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DEL MARCO DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA
<p><b>Impulsores:</b> Satisfacer necesidades humanas básicas. (Pueden entenderse como las causas fundamentales que modifican las presiones sobre la infraestructura. Los indicadores de los impulsores deben describir la evolución social, demográfica y económica de las sociedades)</p>	<p>Por medio de los impulsores y las presiones se pueden describir y simular los escenarios de peligro. Las fuerzas motrices relevantes se identifican según los factores que pueden afectar a las funciones primarias de una determinada infraestructura geotécnica o de su sistema de infraestructuras asociado.</p> <p>Las presiones pueden identificarse en función de las ocho categorías de posibles amenazas a las que pueden enfrentarse las infraestructuras civiles físicas:</p>
<p><b>Presiones:</b> Necesidades humanas específicas que se derivan de las fuerzas motrices y repercuten en el sistema y en el entorno.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El deterioro gradual por el envejecimiento</li> <li>▪ Los daños provocados por las cargas superficiales o el alivio de las tensiones</li> <li>▪ El fuerte aumento de la demanda y las exigencias siempre cambiantes</li> <li>▪ Los efectos del cambio climático</li> <li>▪ Los efectos de la población en aumento</li> <li>▪ Limitaciones de financiación</li> <li>▪ Graves peligros naturales</li> <li>▪ Terrorismo</li> </ul>
<p><b>Estados:</b> Condiciones del entorno natural y constituido y los sistemas humanos</p>	<p>Estados: análisis de ingeniería geotécnica y características de resiliencia pueden estar representados por:</p> <p><b>La robustez</b> de la infraestructura geotécnica puede representarse mediante el estado límite último (ULS) y el estado límite de servicio (SLS). Se realizan análisis geotécnicos para calcular los cambios en el ULS y el SLS causados por los escenarios de peligro generados por las presiones.</p>

MARCO DPSIR	RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DEL MARCO DE EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA
	<p><b>La rapidez</b> se caracteriza por la recuperación en los estados límite de la infraestructura geotécnica con respecto al tiempo.</p> <p><b>La recursividad</b> puede estar representada por los costes necesarios para la construcción, el mantenimiento, la mitigación y la reparación de la infraestructura geotécnica en comparación con un presupuesto disponible.</p> <p><b>La redundancia</b> puede cuantificarse por el número de componentes sustituibles o redundantes dentro de la red de infraestructuras geotécnicas.</p>
<p><b>Impactos:</b> Formas en que los cambios del estado influyen en el bienestar de los seres humanos.</p>	<p>Describir y cuantificar los impactos de la infraestructura dañada en aspectos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Técnicos: pérdida de funcionalidad</li> <li>▪ Sociales: impactos a la salud, calidad de vida, seguridad (muertes, lesiones, evacuaciones) y equidad</li> <li>▪ Medioambientales: contaminación de aire, agua y tierra</li> <li>▪ Económicos: Costos de los daños materiales y el costo de las reparaciones</li> </ul>
<p><b>Respuestas:</b> Esfuerzos institucionales para prevenir, compensar, adaptarse o mejorar a los cambios de estado.</p>	<p>Medidas de mitigación: Tienen como objetivo la prevención y reducción de los impactos.</p> <p>Acciones de rehabilitación: Tienen como objetivo la recuperación de la infraestructura alterada de manera oportuna.</p>

### 3.4 Resiliencia en geotecnia

Actualmente, el concepto de resiliencia está siendo adoptado en el área de la infraestructura, y cada vez se encuentran más trabajos sobre la estimación de resiliencia o el índice de resiliencia, en diferentes obras de infraestructura. La eterna pregunta de "¿cuán seguro es suficiente para ser seguro?" impulsa el desarrollo continuo de los conceptos de diseño de ingeniería. Se creen que los conceptos de diseño de ingeniería se iniciaron a partir del diseño de tensión admisible (ASD), se desarrollaron gradualmente

hasta el diseño de factor de carga y resistencia (LRFD), luego el diseño basado en el rendimiento (PBD), ahora se explora el diseño basado en la resiliencia (RBD) (Zheng et al., n.d.). El concepto PBD empieza a desarrollarse y ser aplicado en la ingeniería antisísmica, y se amplió gradualmente desde el diseño basado en el desplazamiento bajo la acción del terremoto hasta el diseño basado en el riesgo, que incorpora los costes de reparación, las pérdidas por tiempo de inactividad, las víctimas y otras probabilidades de pérdida en las métricas de rendimiento del sistema.

En el campo de la ingeniería geotécnica y subterránea, Huang y Zhang (2016) propusieron un método de evaluación de la tenacidad para túneles de escudo bajo cargas extremas como sobrecarga de suelo, utilizando la convergencia lateral del túnel, como indicador de rendimiento. El índice de resiliencia se define como la relación entre la curva de tiempo-historia integrada del índice de rendimiento bajo sobrecarga extrema y la curva bajo sobrecarga normal. Señalaron que la índice resiliencia del túnel puede mejorarse considerablemente si el período de recuperación del rendimiento del túnel es más corto (Zheng et al., n.d.).

En su mayoría se sigue evaluando los análisis de fiabilidad y robustez existentes en ingeniería geotécnica y subterránea respecto fallas progresivas desarrolladas en condiciones accidentales extremas ya que no pueden reflejar el rendimiento o funcionalidad de las excavaciones. Algunos estudios de falla progresiva encontrando que cuanto mejores sean las condiciones del suelo, mayor será la rigidez de desplazamiento lateral proporcionada por el suelo en el área pasiva y después de que ocurre una falla local, el coeficiente de transferencia de carga de las pilas adyacentes es mayor, lo que indica que es más probable que ocurra una falla progresiva bajo el mismo factor de seguridad o menor robustez y resiliencia, sentando una base para futuras investigaciones sobre la teoría del diseño de resiliencia en el campo de la ingeniería de excavación (Zheng et al., n.d.).

En Colombia algunos estudios han sido desarrollados en el análisis de caso en la ciudad de Bogotá-Colombia. Estos estudios se basan en los conceptos de resiliencia determinando los parámetros que la definen, la aplicación a la gestión del riesgo, así como

---

las metodologías que permiten un acercamiento al cálculo más asertivo de cada uno de sus parámetros. Entre los trabajos más recientes se encuentra, “Estimación del índice de resiliencia en tres estructuras de contención en la vía Sibaté - Fusagasugá, (Rincón y Bonilla)” donde se evalúan tres estructuras de contención de diferentes características y se evalúan los parámetros resilientes para cada estructura teniendo en cuenta la influencia de estas en el tramo vial y su influencia (Rincón Aguirre & Bonilla Parra, 2021), y “Estimación del índice de resiliencia para un grupo de estructuras del entorno urbano que pueden verse afectadas por el uso de tecnologías trenchless en un sector de la primera línea del metro de Bogotá D.C”.

En excavaciones, el trabajo más cercano es el realizado por las estudiantes Natalia Pedreros y Viviana Roncancio, ingenieras civiles de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, el trabajo fue anexo al grupo de investigación en atención y prevención de desastres riesgos y resiliencia. Este trabajo se centra en el término de resiliencia como aporte a la gestión de riesgos en la ingeniería civil donde se adopta el término “índice de resiliencia” para estimar la capacidad de un sistema o estructura civil de recuperar un estado inicial después de haber sido afectado por una perturbación, aplicando los parámetros de las 4R Robustez, Redundancia, Capacidad de Gestión y Recuperación. El objetivo principal del trabajo fue estimar el índice de resiliencia de excavaciones para sótanos ubicadas en la ciudad de Bogotá, aplicado al estudio de caso la Torre Administrativa Sena.

Para alcanzar el objetivo principal, primero se determinaron los criterios que afectan la resiliencia del sistema de excavaciones para sótanos a partir del análisis de los parámetros de resiliencia (4Rs), cabe destacar que la definición de parámetros de resiliencia y sus ponderaciones se realizó a partir de un "juicio de expertos", lo cual puede representar un sesgo en la definición de los parámetros. En un segundo paso, se realizó la caracterización detallada del sistema de excavación del caso analizado con el fin de cuantificar la resiliencia en dos instantes determinados; de esta manera se estableció un proceso a seguir para identificar las ecuaciones con las que se calcula el índice de resiliencia en excavaciones, en un estado antes y en un estado después de una perturbación, se establecieron ponderaciones entre 0 y 100% y valoraciones entre 0 y 1, siguiendo la teoría de simulación de Montecarlo de los factores que pudieran afectar cada uno de los parámetros de las 4Rs, por ejemplo para el caso de la robustez se tuvieron en cuenta los desplazamientos en la superficie del terreno y control de nivel freático y para la capacidad

de gestión se tomaron en cuenta las políticas de riesgo de la zona de afectación de la excavación. A continuación, se presentan las ecuaciones desarrolladas.

**Tabla 3-2:** Parámetros de resiliencia en excavaciones.

Parámetro	Instantes	Ecuaciones
Robustez	Antes	$Rob(t_1) = 0.10(R_1) + 0.10(R_2) + 0.10(R_3) + 0.20(R_4) + 0.20(R_5) + 0.20(R_6) + 0.10(R_7)$
	Después	$Rob(t_2) = 0.175(R_1) + 0.175(R_2) + 0.175(R_3) + 0.10(R_4) + 0.10(R_5) + 0.10(R_6) + 0.175(R_7)$
Redundancia	Antes	$Red(t_1) = 0.30(R_1) + 0.30(R_2) + 0.20(R_3) + 0.20(R_4)$
	Después	$Red(t_2) = 0.30(R_1) + 0.20(R_2) + 0.30(R_3) + 0.20(R_4)$
Capacidad de gestión	Antes	$CGes(t_1) = 0.50(R_1) + 0.20(R_2) + 0.30(R_3)$
	Después	$CGes(t_2) = 0.50(R_1) + 0.10(R_2) + 0.40(R_3)$
Recuperación	Antes	$Rec(t_1) = 0.30(R_1) + 0.70(R_2)$
	Después	$Rec(t_2) = 0.50(R_1) + 0.50(R_2)$

Fuente: (Jazmin Natalia Pedreros Alba Nancy Viviana Roncancio Cabrejo, 2022a)

En una segunda etapa el proceso consistió en aplicar las valoraciones identificadas a la excavación del estudio de caso. Para ello se caracterizó la excavación que se relaciona con el proyecto de la construcción de la Torre Administrativa del Sena en Bogotá identificando el terreno aledaño, los factores de seguridad y el proceso constructivo de la excavación. Con la caracterización realizada se revisó cada aspecto de las ecuaciones y se valoró de acuerdo con las condiciones del sistema analizado, revisando cada uno de los 16 factores identificados para cada instante. Una vez calculada la resiliencia con la valoración de cada parámetro de las 4Rs, se calculó el índice de resiliencia dando como resultado 0.70.

En el trabajo desarrollado por Pedreros y Roncancio se identificó una baja robustez como consecuencia de las fallas en el proceso constructivo y por la presencia de desplazamientos considerables en el terreno, también concluyeron que antes del evento predomina la robustez y la redundancia pero después del evento cobra importancia la capacidad de gestión y la recuperación así se mostró que es importante revisar todos los



aspectos posibles que se pudieran afectar en el sistema de excavación no solamente dentro del marco físico de la misma sino que también aspectos socioeconómicos y técnicos del entorno.

Es importante mencionar que en este trabajo la definición de parámetros de resiliencia y sus ponderaciones se realizó a partir de un "juicio de expertos", lo cual puede representar un sesgo en la definición de los parámetros.

### **3.5 Gestión del riesgo**

La gestión del riesgo es desarrollada por diferentes áreas del conocimiento, y se aplica desde riesgos sociales, culturales, industriales, económico, como los asociados a las catástrofes de índole natural y en muchas ocasiones antrópica, que afectan las poblaciones y los sistemas económicos (Vesga Rojas, 2018a)(Alegría, 2021b). La gestión del riesgo permite la definición de mecanismos de respuesta ante situaciones de riesgo en forma estructurada, operacional y organizacional, destinados a impedir que los riesgos se magnifiquen y/o minimizar su probabilidad de ocurrencia e impacto, a lo largo de todas las fases del ciclo de vida (Alegría, 2021b).

La gestión del riesgo de desastres (GRD), es un proceso social que busca la prevención, reducción y control permanente de los factores de riesgo de desastres incluyendo una adecuada preparación y respuesta ante posibles situaciones de emergencia o desastres, está basada en la investigación científica y el registro de información de detonantes (Servicio Geológico Colombiano, 2015). En general la GRD tiene tres componentes (Alegría, 2021a), (Instituto de Desarrollo Urbano, 2019; Vesga Rojas, 2018b) que buscan enmarcar todas las acciones necesarias para el reconocimiento del riesgo que permitan planificar las medidas para evitar el riesgo, en caso de ser evitado, de lo contrario establecer las acciones de mitigación. También deben establecerse las acciones reactivas para atender de manera rápida y efectiva a la comunidad afectada en la materialización de una amenaza.

**Figura 3-7:** Componentes de la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD).



Fuente: Elaboración propia – Información ajustada de (Alegría, 2021a)

Para una gestión del riesgo efectiva se deben implementar Planes de Gestión de Riesgo de Desastres, que consiste en identificar los peligros y vulnerabilidades de acuerdo con las características de territorio para elaborar un mapa de riesgos, acciones de prevención y reducción, disponibilidad de recursos, acciones de contingencia o respuesta inmediata. Actualmente las políticas de gestión del riesgo deben considerar los siguientes aspectos:

- Identificación del riesgo
- Análisis y revisión de riesgos identificados, para determinar su complejidad
- Priorización de los riesgos en función de su complejidad y nivel de impacto
- Creación de un plan de gestión de riesgos que incluya la mitigación y reducción de todos los niveles de riesgo identificados
- Monitoreo y seguimiento continuo para determinar la efectividad del plan de gestión, realizando los ajustes que haya a lugar

De lo anterior se evidencia la necesidad de implementar la gestión del riesgo a diferentes niveles, ya que se ha determinado que las interrupciones en lo servicios básicos de

infraestructura propagan los efectos de un evento, aumentando el retardo en la recuperación de la población afectada (Internacional, n.d.), en especial en los centros urbanos donde la densificación poblacional genera una excesiva dependencia de las comunidades a las redes cada vez más interconectadas, como son los sistemas de comunicación y las cadenas de suministro, lo que configura un aumento en la vulnerabilidad del área urbana.

### 3.6 Excavaciones en entornos urbanos

En Bogotá la infraestructura producto de la expansión urbana han aumentado los proyectos que contemplan en sus diseños un aprovechamiento del espacio tanto en altura como en profundidad, originando edificios con más sótanos de lo convencional. En el informe de gestión y resultados del 2019 del Instituto de Desarrollo Urbano IDU (IDU 2019), se presenta el recuento de licencias de excavación solicitadas y otorgadas por el instituto en la ciudad de Bogotá entre los años 2016 y 2019. En total se cuenta con 2094 solicitadas y 1922 aprobadas. A continuación, se presentan los datos por año recopilados por la entidad (Tabla 4-1).

**Tabla 3-3:** Expedición y recibo de licencias de excavación 2016-2019.

Licencias	2016	2017	2018	2019	Total
Solicitadas	503	556	532	443	2034
Otorgadas	475	534	490	423	1922
Desistidas y/o negadas	28	19	9	8	64
En proceso	0	3	33	12	48

Fuente: Dirección Técnica de Administración de Infraestructura IDU

Ahora, es preciso establecer el por qué fallan las excavaciones y cómo se afecta el entorno físico en superficie cuando aparecen deformaciones inadmisibles. Primero es de aclarar que se considera falla en dos estados límites, el primero es el estado límite último o de falla, que es cuando se tiene el colapso de los taludes o las paredes de la excavación, falla de fondo por cortes y sub-presiones de las capas inferiores del suelo, fallas en la

cimentación de las edificaciones adyacentes y, en excavaciones subterráneas corresponde al colapso del techo o paredes de la galería.

Por otro lado, se tienen los estados límite de servicio, que corresponden a las deformaciones excesivas por movimientos verticales y horizontales por la descarga en los esfuerzos en la excavación (AIS & Territorial, 2010a). De los factores que causan fallas se pueden identificar dos categorías, una de factores preexistentes a la excavación que corresponden a las características del sitio donde se implanto y otros propios referentes a las necesidades del diseño (Mahmoudabadi & Ravichandran, 2018; Schweiger, 2010a):

**Tabla 3-4:** Factores que causan fallas en excavaciones.

Factores preexistentes	Factores propios
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Las características del medio geológico.</li> <li>▪ El comportamiento mecánico del medio geológico – Perfil estratigráfico.</li> <li>▪ El estado de esfuerzos in-situ.</li> <li>▪ Nivel freático y condiciones de flujo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La redistribución de esfuerzos generados después de la excavación.</li> <li>▪ El diseño dimensional (tamaño, extensión, forma, y orientación de las excavaciones).</li> <li>▪ Diseño y ejecución de las etapas constructivas (carácter dinámico).</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia – información tomada de [49].

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario recordar que la estabilidad de un talud se da por la resistencia al corte del suelo, la cual debe ser siempre mayor al esfuerzo cortante aplicado, por tanto, la inestabilidad en los taludes se da por dos razones, la primera son los cambios en las propiedades del suelo dentro del talud que pueden producirse con el tiempo y segundo, por las diversas condiciones de carga y filtración a las que estará sometido a lo largo de su vida útil, haciendo que la resistencia del suelo sea mayor a la requerida para el equilibrio (J. Michael Duncan Stephen G. Wright Thomas L. Brandon, 2014).

La disminución de la resistencia al corte en el suelo puede producirse por diferentes procesos como el aumento en la presión de poros, reduciendo el esfuerzo efectivo,

---

dependiendo de la permeabilidad del suelo; también influye la presencia de materiales arcillosos tendiendo a comportamientos mecánicos indeseables debido a su potencial de hinchamiento, fluencia, ablandamiento por deformación y cambios debido a efectos fisicoquímicos. Por su parte, el aumento del esfuerzo cortante puede darse cuando se construyen terraplenes, edificaciones con cimientos poco profundos, el aumento del peso del suelo debido al de agua por la infiltración en el talud, incluso una excavación en la parte inferior del talud, induciendo las tensiones de corte en el suelo (J. Michael Duncan Stephen G. Wright Thomas L. Brandon, 2014).

### 3.7 Lógica difusa

Para la ingeniería es primordial el análisis de la información, ya que con esto se tienen modelos aproximados de los fenómenos que se quieren estudiar gracias a las inferencias que los datos permiten hacer. Uno de los inconvenientes ha sido la incertidumbre e imprecisión asociada a la percepción e interpretación en el modelamiento de la realidad, esta una constante ya que ningún problema de ingeniería no contiene toda la información, de lo contrario no sería un problema real ya que no requiere inferencia en los datos para realizar conclusiones a partir de los mismos, pero esto, sumado a las condiciones ya mencionadas, incrementa la incertidumbre sobre la fiabilidad de los resultados. *“El adecuado tratamiento y modelamiento de la incertidumbre conduce a sistemas de ingeniería confiables, económicos y seguros”* (Gómez, 2016).

Regularmente, la incertidumbre es modelada a través de las distribuciones de probabilidad, no obstante, la incertidumbre es una variable que no puede ser constante, ya que varía en todos los casos en donde exhibe comportamientos tales como (el determinismo, aleatoriedad; ambigüedad o no especificidad; vaguedad y la confusión)

Para la incertidumbre por ambigüedad y por vaguedad en donde no es posible definir de manera precisa la verdad o falsedad de una afirmación, el modelaje de la incertidumbre se puede hacer bajo la teoría de la lógica difusa, donde se usan elementos del lenguaje que asocian 'grados' de pertenencia de una forma natural a los eventos o procesos en cuestión. [4]. En este trabajo se ha decidido usar la lógica difusa como herramienta de agregación

debido a que los sistemas basados en lógica difusa permiten calcular cosas cuando hay información con incertidumbre, información imperfecta o situaciones en las que es necesario combinar información tanto cuantitativa como cualitativa.

Los sistemas difusos permiten aproximar dos mundos distintos, el mundo cuantitativo y el mundo cualitativo, siendo esto una gran herramienta para la ingeniería. Una de las principales utilidades es la de trasladar la experiencia humana a una computadora permitiendo automatizar procesos. Otra utilidad es la capacidad de procesar información con incertidumbre, ya que la información que se pretende gestionar en un proceso de toma de decisiones es analizada a través de nuestros sentidos y a través de aparatos de medición, por lo tanto, es información subjetiva por una parte y que tiene cierto nivel de error y/o incertidumbre, y la manera clásica de procesar dicha información y razonar para obtener conclusiones de esa información es usando la teoría de probabilidad y estadística, sin embargo existe ahora una nueva alternativa con el uso del razonamiento aproximado de la lógica difusa aplicado al control difuso (Castillo et al., 2021a; Slashchov & Yalanskyi, 2019; Torres M., Alvaro y Tranchita R., 2004a).

### **3.7.1 Fundamentos de la lógica difusa**

La lógica difusa fue propuesta y posteriormente desarrollada por Lotfi Zadeh en 1973, esta lógica busca establecer resultados precisos o exactos a partir de datos imprecisos, tomando varias posibilidades acertadas o ciertas en los enunciados saliéndose de una posibilidad binaria, es decir, se basa en expresiones que no son totalmente falsas, ni totalmente ciertas (Mendel, 1995a), por ende para una afirmación se establecen niveles de veracidad dentro de un conjunto de valores que se encuentran entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total.

La lógica difusa se basa en la teoría de conjuntos difusos, que son los que dan el valor de veracidad diferente de 1, en esta teoría se precisan dos conceptos primordiales, el primero es el Universo de Discurso ( $X$ ), que es la totalidad de los elementos que se están clasificando y el segundo es la Función de Membresía  $\mu(x)$ , y corresponde a la medida de

pertenencia de un elemento al conjunto difuso, dicha función tiene dominio en el universo de discurso es decir que un elemento  $x$  siempre pertenece al universo de discurso y la imagen de la función va a ser siempre un número real entre 0 y 1 (Mendel, 1995b).

Para generar los conjuntos difusos además del universo de discurso se deben establecer varios términos, el primero es las variables lingüísticas, que determinan el objeto a evaluar, el nombre está representado por la  $x$ , esta variable debe estar en un universo de discurso ( $X$ ), el segundo es valores o términos lingüísticos que son los valores que acepta la variable ( $T(X)$ ) y  $G$  que es la regla sintáctica que generan estos términos o valores lingüísticos. Todos estos términos son establecidos por el experto que establece el conocimiento (Castillo et al., 2021b; O. G. Duarte, 1999)

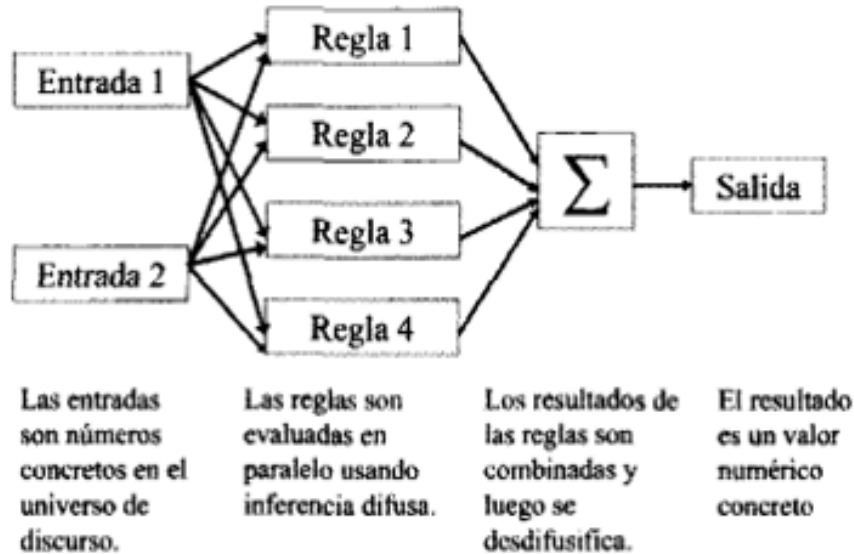
### 3.7.2 Inferencia difusa

Partiendo de uno o varios conjuntos difusos, se pueden establecer a su vez uno o varios conjuntos difusos a través de la regla simple de un condicionamiento representado por el SI y un resultado representado por ENTONCES. A esto se le llama inferencia difusa. Ejemplo: SI mi salario es bajo, ENTONCES no puedo tener muchos gastos. La inferencia difusa es la forma en que el sistema difuso hace la implicación lógica, y se determina a través de un conjunto de proposiciones simples del tipo SI (Condicionamiento)\_ ENTONCES (Resultado) las cuales a través de un sistema de reglas permiten obtener el modelo de conocimiento asociado al problema que se quiere resolver. Una regla expresa la relación entre los conjuntos difusos  $A$  y  $B$ , donde la función característica está dada por  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$  (Jantzen, 1998).

Los sistemas de lógica difusa usan un sistema de inferencia difuso con datos de entrada específicos y concretos, para obtener datos concretos. Este sistema consta de 5 partes:

- Una cantidad de reglas difusas (si... entonces).
- Una base de datos de las funciones para definir las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos
- Bloque de operaciones por inferencia según las reglas, para la toma de decisiones.
- Interfaz de difusificación, aquí las entradas precisas se convierten en grados de equivalencia lingüísticos
- Interfaz de desdifusificación, aquí los resultados difusos de la inferencia se convierten en una salida precisa.

**Figura 3-8:** Sistema de inferencia difuso.



Fuente: Tomado de (Torres M., Alvaro y Tranchita R., 2004b)

Existen 3 métodos de inferencia que permiten realizar la agregación de los conjuntos difusos:

- Mamdani: se evalúan las reglas mediante un operador de agregación, obteniendo funciones de pertenencia. Se desfusifica el conjunto difuso. Para un Mamdani de dos entradas y dos reglas: cada entrada tiene dos reglas, de allí se obtienen dos valores (uno por cada entrada) que limitan las funciones de pertenencia, luego estas últimas serán combinadas en una nueva función.
- Tsukamoto: “los consecuentes de la regla son funciones monótonamente no-decrescentes. La salida inferida de cada regla se define como un valor cierto inducido”. El promedio ponderado de la salida de cada regla es la salida global.
- TSK (Takagi, Sugeno y Kang): la combinación lineal de variables de entrada y un término constante, es el consecuente de cada regla. Al igual que en el Tsukamoto, la salida global es el promedio ponderado de la salida de cada regla.



### 3.8 Operadores de agregación

Una de las problemáticas que en la actualidad existen es el agregar, sintetizar o combinar información entre series de datos de diferentes fuentes diversas, todo ello para poder lograr conclusiones al respecto o para la toma de decisiones. Esta problemática sucede en cualquier disciplina desde la medicina, la economía, la estadística o la teoría de control.

Dentro de las aplicaciones de estos operadores de agregación se encuentra la adquisición de conocimiento o toma de decisiones a partir de grandes volúmenes de datos, entre otros. De acuerdo con lo anterior, la naturaleza de los sistemas donde se aplican los operadores se divide en dos grandes grupos; "Agregación de información para la toma de decisiones: este abarca todos aquellos escenarios en los que se dispone de varias opciones o criterios distintos y se pretende tomar una decisión lo más coherente posible con la información inicial; Agregación de información para la descripción o representación de objetos: Es necesaria cuando se dispone de varias informaciones relativas a un mismo objeto pero complementarias y procedentes de fuentes expertas, sensores, etc. distintas, y se pretende construir a partir de ellas una descripción global del objeto en cuestión" (Martínez & Acosta, 2015).

A pesar de que existen varios medios matemáticos con la capacidad de realizar cálculos con conocimiento imperfecto tales como, cálculo de probabilidades, teoría de la posibilidad y teoría de la evidencia, actualmente se ha desarrollado metodologías con base a la lógica difusa de gran validez y cada vez más frecuente uso (Blanco-Mesa et al., 2020a).

Si bien la lógica difusa es el más importante entorno matemático, la selección del operador de agregación cobra una gran importancia, para ello, hay algunas condiciones que se deben tener en cuenta para la selección de los operadores, los cuales son: fuerza axiomática, limitada por los axiomas que satisface; ajuste empírico, deben representar la realidad y esta es ajustada por el experto del sistema; adaptabilidad, la facilidad de adaptar mediante la parametrización; eficiencia numérica, que requiera menor esfuerzo computacional para resolver problemas grandes; compensación y rango de compensación, cuanto mayor sea el grado en que se contrarrestan las funciones de pertenencia de los conjuntos borrosos agregados, el operador de agregación representará mejor las situaciones en las que unos atributos son compensados por otros; comportamiento

agregado, el grado de pertenencia de un conjunto difuso en el conjunto agregado el cual depende directamente al número de conjuntos combinados; nivel de escala de las funciones de pertenencia, diferentes operadores pueden requerir diferentes niveles de escala (nominal, intervalo, ratio o absoluto) de información de pertenencia para ser admisibles; comportamiento conjuntivo o intolerante, se desea que todos los criterios a combinar se satisfagan, y se representa mediante cualquier operador menor o igual que el mínimo, las t-normas cumplen el requisito; comportamiento disyuntivo o tolerante, si uno de los criterios se satisface para obtener la satisfacción global, está representado por cualquier operador mayor o igual que el máximo, las t-conormas resultan operadores adecuados; comportamiento de compromiso, en muchas ocasiones, se desea obtener un resultado intermedio que no refleje ni la falta absoluta de compensación que supone el comportamiento conjuntivo ni la compensación total del comportamiento disyuntivo, dicho comportamiento está presente en todos aquellos operadores comprendidos entre el mínimo y el máximo (Martínez & Acosta, 2015).

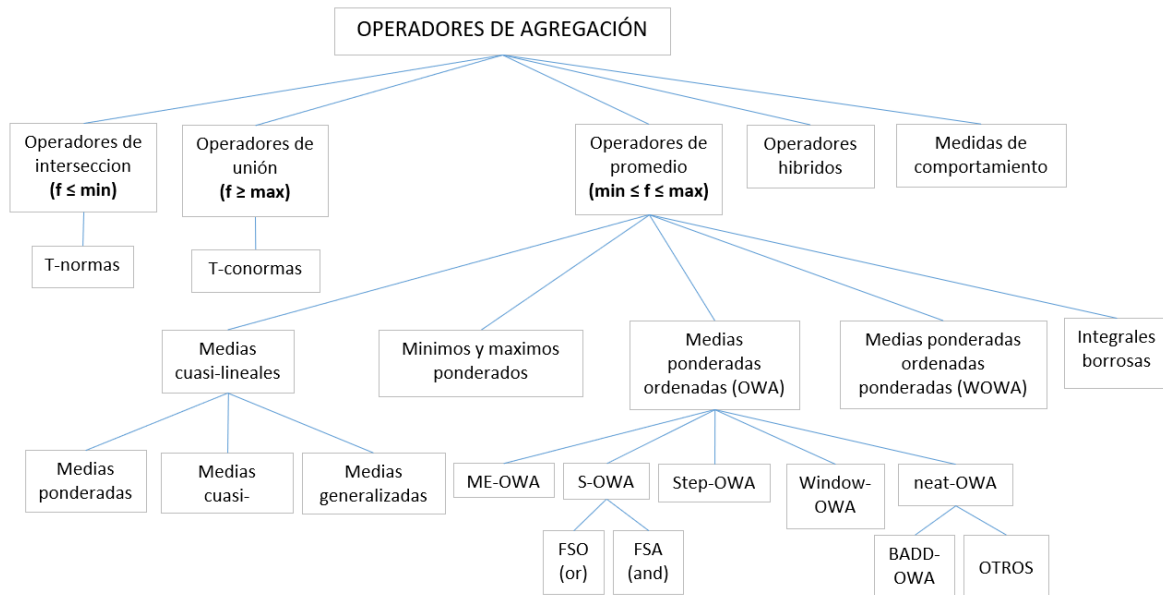
Los operadores se clasifican en 4 grupos:

- Menores o iguales que el mínimo: Son aquellos que exigen que todos los criterios agregados se satisfagan de forma simultánea. Esta clase, se denominan operadores de intersección donde encontramos el operador T-Normas.
- Mayores o iguales que el máximo: Son aquellos que generan un resultado que está acotado inferiormente por el mayor de los elementos agregados. Se denominan operadores de unión, donde encontramos el operador T-Conormas.
- Comprendidos entre el mínimo y el máximo: Son aquellos que, al contrario que en los dos casos anteriores, describen el promedio de los valores, lo que implica la aplicación de la lógica difusa como alternativa sobre la probabilidad (Fodor et al., 1995; Gómez, 2016). Estos se denominan operadores de promedio, en este grupo encontramos los siguientes operadores:
  - Medidas Cuasi Lineales
    - Medidas ponderadas

- Medidas Cuasi-Aritméticas
- Medidas generalizadas
  
- Mínimos y máximos ponderados.
  
- Medidas ponderadas ordenadas (OWA): Un aspecto característico de estos operadores de agregación es la reordenación, Un agregado  $x_i$  no está asociado con un peso particular  $w_j$ , sino que un peso está asociado con una posición ordenada  $j$  particular de los argumentos. Esta ordenación introduce la no linealidad en el proceso de agregación, dentro de estos operadores se tienen los siguientes:
  - ME-OWA.
  - S-OWA.
  - Step-OWA.
  - Window-OWA.
  - Neat-OWA.
  
- Medidas ponderadas ordenadas ponderadas (WOWA).
- Integrales Borrosas.
  
- Híbridos: Son todos aquellos que presentan una actitud mixta y que por lo tanto no pertenecen a ninguno de los tres grupos anteriores.

En la Figura 3-9 se representan las familias de los operadores de agregación por medio de un mapa conceptual.

**Figura 3-9:** Familias de operadores de agregación.



Fuente: Elaboración propia, a partir de la base de (Detyniecki, 2001a; Fodor et al., 1995).

En este trabajo se considera el uso de la aplicación realizada por el profesor E Duarte donde propone una nueva familia de operadores de promedio ponderado ordenado OWA utilizando fórmula de Faulhaber, en el que el vector de pesos para la agregación está en función de la actitud del evaluador que realiza los modelos de comportamiento del sistema a revisar (O. Duarte & Téllez, 2018a). Este operador introduce una variable llamada orness que permite simular una actitud optimista o pesimista con el objetivo de que evaluadores puedan conocer el panorama completo de la situación modelada y así tomar las decisiones de acuerdo con el nivel de riesgo que se quiera asumir. A continuación, se presenta de manera breve las consideraciones de la nueva familia de operadores.

### Cálculo de pesos: Orness

El Orness se refiere al grado en que la agregación de los datos, “*está siendo una medida de optimismo comprendida en el intervalo unitario, este nos indica a partir de  $W$  que tan cercano se encuentra el operador al operador máximo (OR) o al operador mínimo (AND)*” (Blanco-Mesa et al., 2020b; Delgado et al., 2006; Detyniecki, 2001b).

Según los teóricos, un operador OWA se considera optimista si  $Orness(W) > 0.5$ , pesimista si  $Orness(W) < 0.5$  y neutro si  $Orness(W) = 0.5$ , lo que nos ayuda a reflejar la actitud del operador y así poder comparar el nivel de optimismo referente al resultado. Definimos  $f(x): [0, 0.5] \rightarrow [0, 1]$  una función monótonamente creciente con  $f(0) = 0$  y  $f(0.5) = 1$  (O. Duarte & Téllez, 2018a). El valor de  $W_n$  debe variar entre 1 a  $1/n$  cuando  $\alpha$  varía de 0 a 0.5 utilizamos  $f(\cdot)$ :

$$W_n = 1 - \Delta \quad \Delta = f(\alpha) \left(1 - \frac{1}{n}\right) = \frac{f(\alpha)(n-1)}{n} \quad (4.2)$$

Usando estas condiciones, la suma de los otros pesos debe ser

$$\sum_{i=1}^{n-1} W_i = \sum_{i=1}^m W_i = \Delta \quad m = n - 1 \quad (4.3)$$

Definiendo el Orness así

$$Orness(W) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i) W_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (n-i) W_i = \alpha \quad (4.4)$$

Se propone una distribución de  $\Delta$  siguiendo una relación lineal

$$W_i = K_i + b \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.5)$$

Utilizando las definiciones anteriores se debe imponer la condición  $K \geq 0$  y así se obtiene  $f(\alpha) \geq 2$  por lo cual se definen las siguientes restricciones para  $f(\alpha)$

$$2 \leq f(\alpha) \leq 3 \quad (4.6)$$

Si se elije  $f(\alpha) = 1 - (1 - 2\alpha)^\beta$  con algún  $0 \leq \beta \leq 1$  estas restricciones se satisfacen si la pendiente 0 está en  $[2, 3]$ .

$$2 \leq \frac{df(\alpha)}{d\alpha} |_{\alpha=0} \leq 3 \quad (4.7)$$

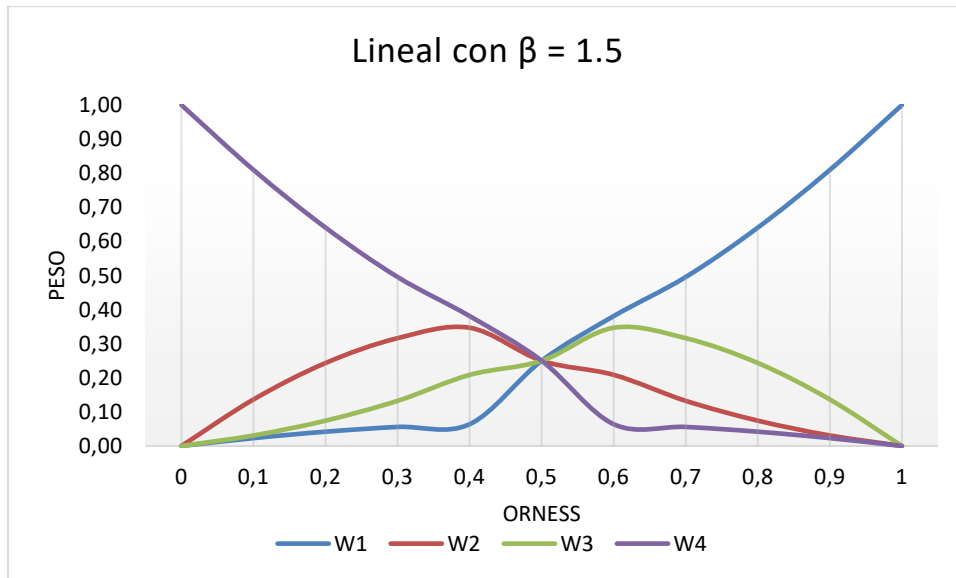
$$2 \leq 2\beta(1-2\alpha)^{\beta-1} |_{\alpha=0} \leq 3 \quad (4.8)$$

$$2 \leq 2\beta \leq 3 \quad (4.9)$$

$$1 \leq \beta \leq 1.5 \quad (4.10)$$

Utilizando las notaciones anteriores y el  $\beta = 1.5$  obtenemos los pesos de manera lineal

**Figura 3-10:** Pesos en el operador OWA usando el método lineal.



Fuente: elaboración propia.

## 4. Marco metodológico para la evaluación de resiliencia en excavaciones

Después de la revisión bibliográfica y ahondar en las definiciones de la resiliencia, su campo de acción en la infraestructura y los métodos de cálculo, se establece la metodología desarrollada para definir los términos que describen los parámetros de resiliencia de una excavación y su entorno para el posterior cálculo del índice de resiliencia. Como parte del método de investigación aplicada, se pretende evaluar el índice de resiliencia al caso sobre el edificio Green Office en la Ciudad de Bogotá. A continuación, se describe brevemente las actividades para el desarrollo de ese trabajo.

### 4.1 Definir los términos de cada parámetro de resiliencia

Se establecen los parámetros de resiliencia del sistema a evaluar, en este caso, el sistema es el compuesto por la excavación y la infraestructura circundante a esta. De acuerdo con el marco de DPSIR se propondrán los parámetros de resiliencia luego de identificar claramente los componentes de la robustez, la redundancia, rapidez o capacidad de gestión, y recuperación.

Desde el punto de vista geotécnico la **Robustez** se puede determinar a partir de la estabilidad general del entorno de la excavación y de la estabilidad geotécnica, esto implica la falla de fondo y el desarrollo de deformaciones a medida que se va avanzando con las etapas de excavación hasta el momento de generación del Estado límite último, es decir, la falla, que para este estudio se considera como el evento disruptivo del sistema.

En la evaluación de los componentes de la **Redundancia**, se examina el sistema, es decir, se establece que la excavación no está aislada y que cualquier afectación explícitamente conlleva a daños en la infraestructura circundante. Por lo tanto, se revisan las cualidades de funcionalidad de las vías, redes de servicio y demás construcciones y servicios vecinos como andenes y parques.

Para la **Capacidad de Gestión** del sistema en el momento de presentarse un evento, se incluyen dos perspectivas, una interna y otra externa. La interna, se refiere a las acciones que se pueden tener desde el diseño y posterior construcción de la excavación, en este caso por ser una obra geotécnica, se plantea revisar a detalle la propuesta y ejecución de un plan de monitoreo geotécnico. La perspectiva externa es la revisión y caracterización a nivel socioeconómico del área de influencia, así como las políticas distritales para la atención de emergencias.

Finalmente, se conceptúan los componentes de la **Recuperación** que son las acciones para el restablecimiento de las condiciones normales del sistema. En este caso, se considera importante determinar el nivel de intervención requerido para retomar el normal funcionamiento identificando si se requiere de rehabilitación, reparación o reconstrucción en la excavación y el área afectada. Adicionalmente se define el rendimiento esperado en el restablecimiento de los servicios públicos en el área en caso de que estos hayan sido interrumpidos a causa de un evento.

## 4.2 Definir el modelo de lógica difusa

Después de una revisión, se llegó a la conclusión que la lógica difusa es la herramienta que permite automatizar la agregación de los términos definidos para cada parámetro (Shahin et al., 2009), pues permite hacer la agregación la correcta combinación de criterios para cada parámetro, teniendo en cuenta que se están trabajando con propiedades cualitativas y cuantitativas.



---

Por lo anterior, se establecen las 4R bajo las definiciones de la lógica difusa, describiendo las Variable lingüísticas, el Universo de discurso, los Términos lingüísticos y las Funciones de membresía para cada variable de entrada y salida. Luego se establecen las reglas de implicación, que son reglas de tipo “SI\_Entonces” para establecer la inferencia difusa y así generar el modelo de conocimiento para la correcta agregación de los términos.

### **4.3 Cálculo de los parámetros de resiliencia**

Con los criterios de cada parámetro de resiliencia del paso 4.1 y el marco de evaluación del paso 4.2 se programa en el sistema de cómputo numérico MATLAB, que cuenta con una aplicación llamada Fuzzy Logic Toolbox™ que permite diseñar, analizar y simular sistemas de lógica difusa que modelan funciones no lineales de diferente complejidad (Mendel, 1995a; The MathWorks, 1999). Esta herramienta permite crear sistemas difusos que se ajuste a cualquier conjunto de datos de entrada-salida, haciendo más sencillo el proceso gracias a las técnicas adaptativas de los sistemas de inferencia con conjuntos difusos.

Con los criterios programados en Fuzzy Logic, se determinan los valores de los criterios definidos para los parámetros de resiliencia en base a la información del caso de falla del edificio Green Office.

### **4.4 Evaluación de resiliencia con el operador OWA**

Debido a que el cálculo de la Resiliencia consiste en la agregación de cuatro parámetros (Robustez, Redundancia, Capacidad de Gestión y Recuperación), uno de los principales desafíos es la determinación de las ponderaciones para cada parámetro. Para ello se realizó una investigación minuciosa de las metodologías para hacerlo, entre ellas se estudió la teoría de grafos, otra aplicación de la lógica difusa que es el sistema de cómputo con palabras, el control difuso y los operadores de agregación tipo OWA.

La teoría de grafos representa una aproximación porque permite representar de manera grafica las relaciones de un sistema, sin embargo, no es consistente para hacer una

agregación de parámetros como se requiere en este caso. Por otra parte, el sistema de cómputo por palabras basado en aritmética difusa permite el modelado de situaciones complejas de un elevado número de variables sin problema de explosión de la base de reglas, como se tiene en el control difuso, no obstante el modelo necesita de una función de conocimiento aproximado que debe estar evaluada por expertos en el área de aplicación, en el caso de la resiliencia no se han establecido conceptos que permitan determinar la experticia de los investigadores, o una integración de conceptos en el área específica de la resiliencia en excavaciones, que permita establecer esa función.

Después de revisar la teoría de los operadores de agregación, se pudo determinar el uso de un operador tipo OWA que permite aplicar la actitud del evaluador y obtener una valoración de tipo optimista y pesimista con el fin de obtener una gráfica con todos los posibles valores de resiliencia como herramienta de comparación que, a su vez, pueden orientar a la toma de decisiones. Finalmente, con el operador programando, se evalúan los escenarios antes y después del evento, tanto con la actitud pesimista y optimista para tener una curva de resiliencia en cada caso.

## **5. Caso de estudio Edificio Green Office**

### **5.1 Resumen**

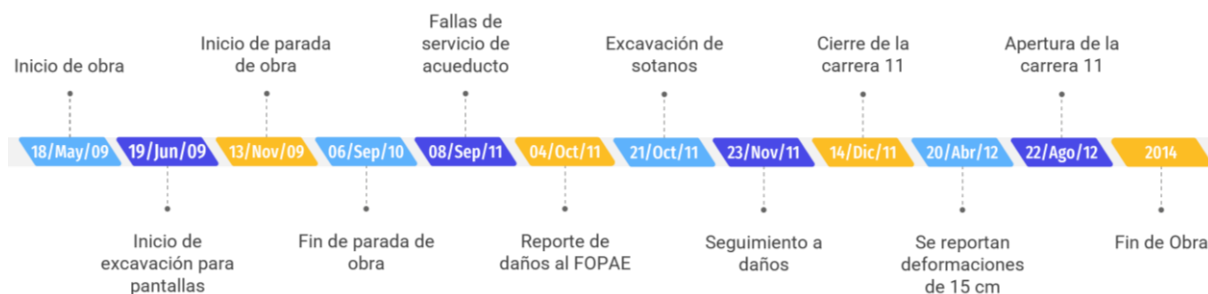
El edificio Green Office es un proyecto de infraestructura que contempla la construcción de una edificación para uso comercial de locales y oficinas. Inicialmente el proyecto contemplaba tres sótanos y seis pisos de altura, lo cual cambió durante construcción. En este proyecto se presentaron inconvenientes durante las excavaciones realizadas para la construcción de muros pantalla de los sótanos. El inicio de la construcción se registra el 18 de mayo de 2009, trascurridos dos meses, se registra en bitácora de obra filtraciones de agua en la instalación de algunos módulos de la pantalla de contención. La obra se para

durante un periodo de 10 meses comprendidos entre el 13 de noviembre de 2009 y el 06 de septiembre de 2010 cuando se registra el reinicio de la obra. Después de un año de actividades en la construcción de la excavación de los sótanos con el registro de afectaciones alrededor de la misma, el día 23 de noviembre del 2011 un gestor de la empresa de Acueducto de Bogotá (EAAB) realiza un reporte mostrando la gravedad de los hundimientos de las vías, andenes y espacio público alrededor, así como agrietamientos en edificaciones adyacentes y daños en las redes de servicio, especialmente de acueducto y alcantarillado.

Debido a los daños en las redes y el entorno, en el mes de diciembre se cierra la carrera 11 entre calles 100 a 94 para el tránsito vehicular, y se restringe el paso peatonal en el parque de la Calle 98 localizado al costado sur de la construcción. Finalmente, la constructora a cargo del proyecto realizó las obras de reparación y reconstrucción necesarias para recuperar el funcionamiento tanto de la vía, como del espacio público y se restableció el flujo vehicular en agosto de 2012, 11 meses después del cierre.

A causa de los daños presentados en las redes de acueducto y alcantarillado, la EAAB contrató a la Universidad Nacional de Colombia por medio de un acuerdo Interadministrativo, con el fin de realizar un estudio donde se evaluará los daños y se determinará las causas del hundimiento ocurrido en la zona de influencia del proyecto. Este estudio concluye que el factor detonante fue la construcción inadecuada de los sótanos del proyecto.

**Figura 5-1:** Cronología de eventos



Fuente: Elaboración propia.

## 5.2 Localización

El Edificio Green Office se localiza entre las calles 98 y 99, y las carreras 11 y 11 A de la ciudad de Bogotá, localidad de Chapinero, sector Catastral Chicó norte. En la Figura 5-2 se presenta la localización del proyecto, en rojo se demarca el área de intervención.

**Figura 5-2:** Localización del proyecto Green Office. Imagen de Google Earth.



Fuente: Captura tomada de Google Earth.

## 5.3 Descripción del proyecto

El proyecto de construcción Green Office es un edificio de seis pisos de altura y tres sótanos, ubicado en el nororiente de la ciudad de Bogotá. Tiene una estructura de concreto reforzado hasta el primer piso y los últimos 5 pisos se proyectaron en estructura metálica. El peso inicial del edificio es de 10 Ton/m<sup>2</sup> y cargas en pedestales cercanas a 900T. La cimentación se contempló con la combinación de placa y pilotes de concreto y la excavación de los sótanos llegaba a 10 m de profundidad.

El proceso constructivo estipulado en documento original de estudio de suelos menciona como requerimiento la implementación de muros pantalla en los costados oriental, suroccidental, nororiental y sur, de mínimo 0.4 m de ancho y una longitud de 1.7 veces su altura libre para un total de 17 m, soportados con vigas tipo andén en el primer piso, apoyadas sobre pilotes circulares. En el informe de estudio de suelos no se especificó una secuencia para las excavaciones del primer sótano. Para el segundo sótano, se recomendó hacer la excavación por etapas para reducir el rebote elástico del terreno. Adicionalmente se recomendó la construcción de caissons en concreto simple de una altura de 1m por anillo, llegando hasta los pilotes y se fundirán los dados, columnas, placas de los dos primeros sótanos y la placa del primer piso.

## **5.4 Características del evento y posibles causas**

De acuerdo con el reporte del FOPAE del 4 de octubre de 2011 se menciona que en la obra de construcción del Edificio Green Office a cargo de la constructora Pijao, se adelantaba la excavación para el tercer sótano hacia el costado norte o calle 99 entre carrera 11 y 11A cuando se reportan daños en edificaciones ubicadas al norte de la construcción y afectaciones al sendero peatonal del costado sur (parque en calle 98 sur entre carreras 11 y 11A), por deformaciones y asentamientos diferenciales de los prefabricados en el sendero peatonal. De acuerdo con el FOPAE entre las posibles causas que al parecer generaron las grietas, fisuras y deformaciones en los predios aledaños a la construcción del proyecto comercial, “[...] se destacan los movimientos diferenciales del terreno inducidos posiblemente por las obras de construcción adelantadas en el predio en mención, donde es posible que no se haya tenido en cuenta la susceptibilidad, vulnerabilidad y/o fragilidad de las edificaciones existentes vecinas, así como tampoco las obras adecuadas para mitigar el impacto generado por las actividades de excavación y construcción, el desconfinamiento del terreno, el cambio en las condiciones del nivel freático, los asentamientos y las deformaciones en el terreno”. El FOPAE concluye que, aunque los daños no comprometen la estabilidad de las edificaciones aledañas al edificio Green Office, advierte que de no tomarse medidas preventivas se podría producir un aumento en las afectaciones evidenciadas.

En los reportes de las entidades que atendieron la emergencia (EAAB, FOPAE) en el edificio Green Office debido a la excavación para los sótanos se presenta una sobrecompensación de esfuerzos verticales entre 30 y 50 kPa, llevando a condiciones desfavorables para el proceso constructivo que pueden derivar en fallas de fondo y deformaciones inadmisibles en la excavación. Las condiciones impuestas por estos esfuerzos no se tienen en cuenta en ninguna parte del estudio original realizado para el proyecto.

En el parque aledaño y sobre la carrera 11 no se reportaron ni observaron colapsos o movimientos significativos en el suelo, antes del inicio de la excavación del Green Office. Se plantea la hipótesis que el hundimiento en la carrera 11 se debe a una falla de fondo ocasionada por la excavación de los sótanos, acompañado de fisuras en estructuras, agrietamiento del suelo, pavimentos y vías. La Falla de fondo consiste en el levantamiento del suelo del fondo de la excavación y el hundimiento de la superficie de la parte alta del talud de la excavación. El peso del bloque de suelo localizado junto al corte tiende a desplazar el suelo subyacente hacia la excavación. Si el suelo subyacente experimenta una falla por capacidad portante el fondo de la excavación se levanta y la presión lateral de tierras sobre el muro aumenta considerablemente (Cheng & Lau, 2008; HATHEWAY, 1996). El muro puede presentar pérdida de verticalidad e incluso colapso.

Antes del inicio de la construcción del Edificio Green Office, los archivos no reportan variaciones ni desplazamientos relevantes sobre la carrera 11, en uno de los reportes de la Alcaldía Local resalta que en el área no existía edificaciones con sótanos profundos o alturas mayores a 4 pisos en los costados oriental y occidental, por lo tanto, no existía la posibilidad de presentarse deslizamientos en el terreno.

En el estudio realizado por la universidad Nacional de Colombia, se encuentran deficiencias, errores y omisiones a la NSR-98 y NSR-10, en el documento llamado “Estudio de Suelos y Análisis de Cimentaciones Centro Empresarial Pijao – AUS 6812”. Se identificó que en el estudio de suelos se realiza una mala clasificación de la complejidad del proyecto, se hacen análisis geotécnicos deficientes y poco sustentados, no se presentan cálculos de presiones debidas al agua encontrada a 3m bajo la superficie, tampoco se

---

presenta sustentación de los parámetros de diseño y la distribución de cargas, no existe un capítulo de recomendaciones de protección a edificaciones y predios vecinos,, se ignoran las cargas debidas al tráfico de las calles aledañas y de las estructuras vecinas para el diseño de la excavación y muros, y por ultimo no se presentan memorias de cálculo para sustentar las dimensiones de las pantallas perimetrales.

En la revisión de documentos del proyecto hecho por la Universidad Nacional, se encontró que el especialista no presenta un análisis para cimentación flotante en el estudio de suelos del edificio Green Office, lo que lleva a ignorar el estado de sobrecompensación y esto a su vez a ignorar condiciones críticas para el proceso de construcción que pueden implicar fallas durante la misma. Tampoco se presentó el cálculo de las presiones del agua que genera flujos ascendentes y lleva a un cálculo erróneo de la carga que deben soportar los pilotes recomendados en el estudio de suelo.

El estudio realizado con el fin de “establecer y evaluar las causas de las fallas y el hundimiento que afectaron las redes de acueducto y alcantarillado en el sector comprendido entre las calles 97 y 100; y las carreras 11 y 11A, presentado el pasado 14 de diciembre de 2011” concluye que la excavación de los sótanos del Edificio Green Office es el factor principal de las fallas y deslizamientos presentados ya que los daños recopilados en el informe realizado por la Universidad Nacional de Colombia, son los mismos que se encuentran en una falla de fondo de una excavación. Entre las principales afectaciones encontradas están:

- Falla parcial de la estructura de cimentación de la edificación y el hundimiento del parque de la Calle 98.
- Filtraciones de agua en el andén de la carrera 11 No. 98- 11, lo que causa un taponamiento en la acometida cercana.
- Hundimiento en la carrera 11 con calle 98 y calle 99 donde se evidencia un deterioro progresivo, acelerado y de gran magnitud, que ha socavado la estructura de soporte del del espacio público y de la vía generando daños y deformaciones de hasta 60 cm en el carril occidental de la calzada Oriental.
- El 23 de noviembre el área de alcantarillado reporta tubería estallada.
- En la obra se observaron pantallas fracturadas y pilotes desplomados.

Todas estas afectaciones llevaron a la constructora Pijao a iniciar la construcción de obras de “mitigación” consistentes en la construcción de nueva pantalla por delante del existente que estaba fracturada, así como la conclusión de un relleno fluido en zona donde se presentó hundimiento del parque y micropilotes en algunas de las zonas perimetrales.

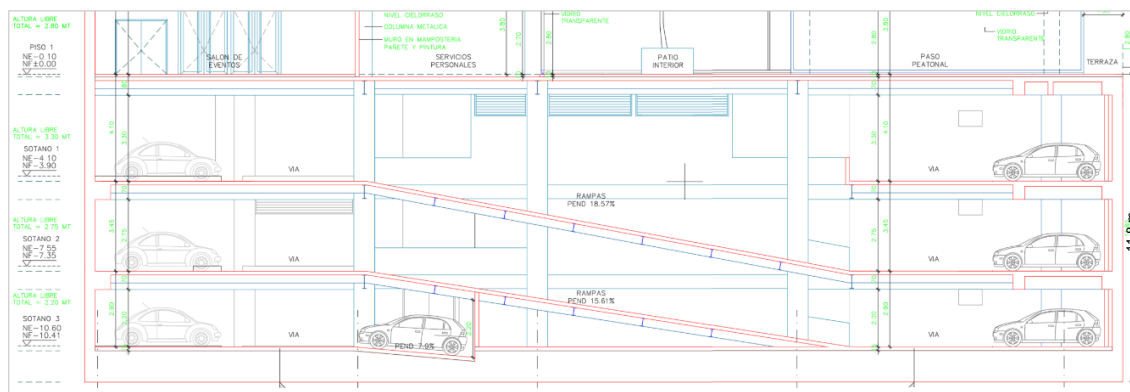
## **6. Análisis geotécnico de la excavación**

Antes de definir los criterios de resiliencia del sistema conformado por la excavación y el entorno, se hará un análisis de las características dimensionales de la excavación con base en la información recopilada del estudio de caso descrito en el numeral anterior, ya que se amplían los datos del informe de suelos original y se incluye la exploración geotécnica realizada por la Universidad Nacional de Colombia que complementa el perfil estratigráfico y los parámetros de resistencia y deformación de los materiales presentes en el área.

El nivel inferior de la losa de entrepiso de la excavación está a 11.8 m de profundidad, tiene un espesor de 1,2 m. Las pantallas de contención perimetrales tienen una profundidad de 17 m y un espesor de 40 m de acuerdo con el estudio de suelo del proyecto.



**Figura 6-1:** Corte longitudinal de la excavación.



Fuente: Archivos de la licencia de construcción.

## 6.1 Perfil geotécnico

Para establecer el perfil estratigráfico de la excavación la Universidad Nacional realizó seis perforaciones entre 45 y 50 m de profundidad, dos CPTu con medición de presión de poros y seis pruebas geofísicas de propagación de ondas tipo Down Hole. Para clasificar los materiales se realizaron 144 ensayos de contenidos de agua, 174 límites de Atterberg, 118 pesos específicos, 147 ensayos de contenido de finos sobre tamiz N°200, 93 pruebas de material orgánico, 51 ensayos de resistencia confinada, 27 cortes directos, 37 ensayos de consolidación unidimensional y 1 triaxial.

Para la calibración de los parámetros se revisaron los valores mínimos y máximos de resistencia ( $c'$  y  $\phi'$ ) de los ensayos de caracterización mecánica, para el peso unitario y el módulo de deformación se adoptaron los promedios de los ensayos de laboratorio. Para los módulos de rigidez y la permeabilidad se asumieron valores de relación de Poisson para cada material contrastando con los valores obtenidos de los ensayos de disipación del CPTU y calibrados con los ensayos Triaxiales. De lo anterior se establecen los parámetros geomecánicos como se muestra en la Tabla 6-1 para los modelos de análisis de la excavación. Los cuales se validaron para este trabajo por medio una comparación cualitativa y cuantitativa de los registros de los sondeos y los resultados de los ensayos de laboratorio estableciendo el perfil, el cual se comparó con el obtenido de los ensayos CPTU encontrando gran similitud en espesores de material y algunos parámetros de resistencia.

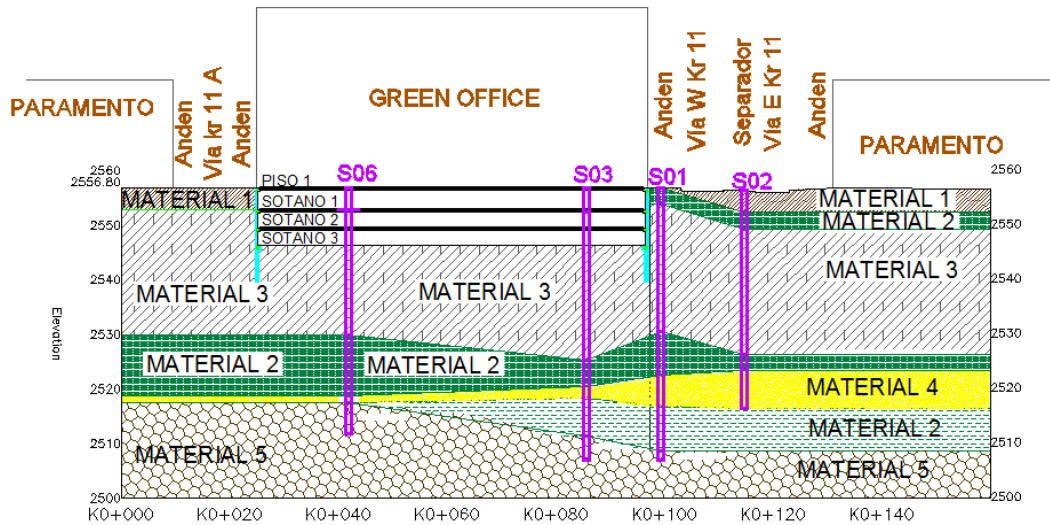
**Tabla 6-1:** Parámetros del perfil geotécnico.

Material	Suelos	$\gamma$	$c'$	$\phi'$	E	G	k
		(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(°)	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(m/s)
1	Material Superficial	15.97	33.333	23.214	1086.18	402.29	9.30E-10
2	Arcilla Blanda	14.87	5.053	23.917	4220.18	108.15	9.91E-10
3	Arcilla Muy Blanda	13.39	6.305	19.297	2885.42	53.29	7.42E-10
4	Arena Limosa	17.82	0.000	34.797	1144.74	440.29	2.20E-08
5	Coluvión Y Residual	18.46	0.000	42.409	1736.73	643.23	2.00E-09

Fuente: Estudio UNAL

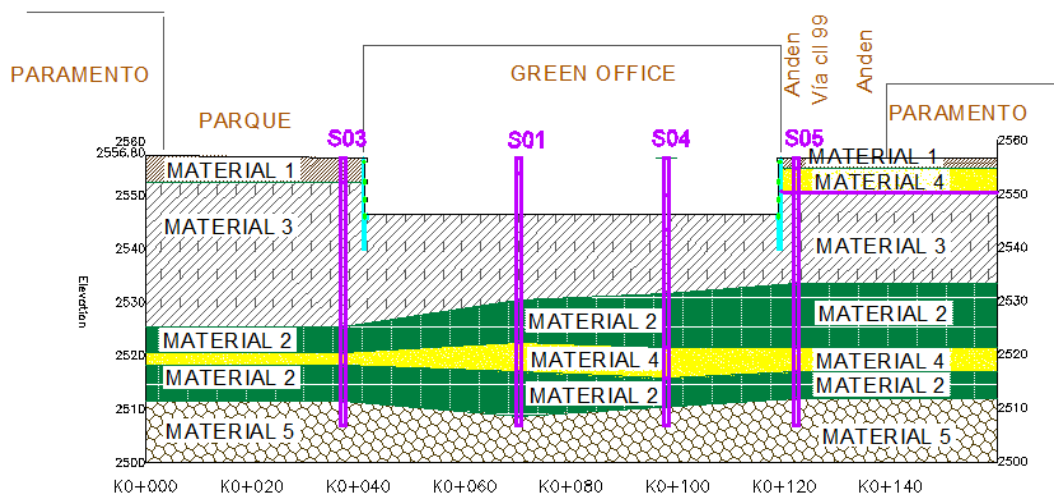
Con los resultados de las perforaciones se realizó el perfil en dos secciones, la primera corresponde a la sección transversal de la carrera 11 ya que esta representa los hundimientos tenidos en la vía; y la segunda es la sección longitudinal a la altura del parque sobre la calle 98, donde se presentó el mayor hundimiento y la evidencia de deformaciones que establecen la falla de fondo. Las secciones son tomadas del estudio de la Universidad Nacional de Colombia y se presentan en las figuras Figura 6-2 y Figura 6-3, con los parámetros geotécnicos de la Tabla 3-1 resultado de la exploración geotécnica para el análisis del fenómeno ocurrido.

**Figura 6-2:** Sección 1, perfil de suelo paralelo a la carrera 11.



Fuente: Estudio UNAL

**Figura 6-3:** Sección 2, perfil de suelo perpendicular a la carrera 11.



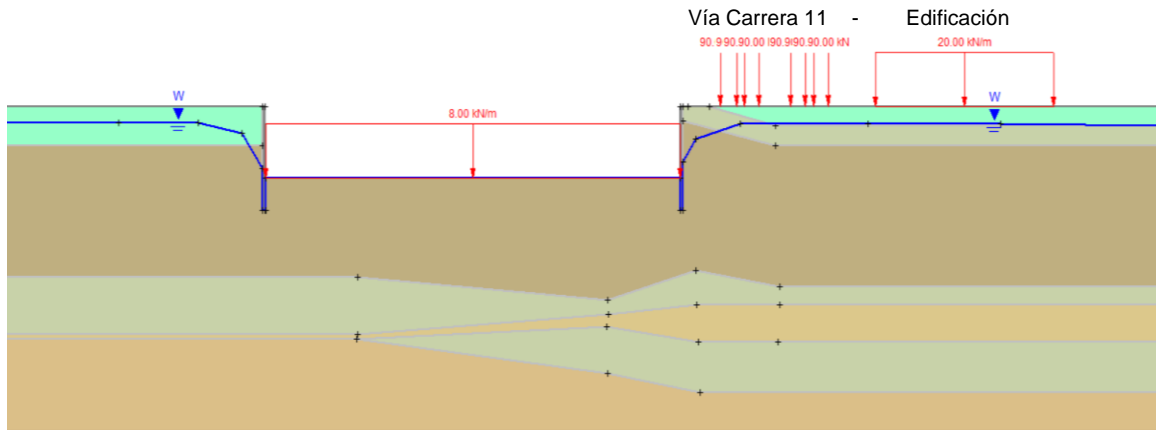
Fuente: Estudio UNAL

## 6.2 Análisis de equilibrio Limite

Para las dos secciones consideradas se pretende realizar los análisis de equilibrio limite, que permitirán establecer los factores de seguridad y la probabilidad de falla de la excavación estableciendo las superficies de falla que cumplan con los requisitos estáticos y cinemáticos, es decir, que los factores de seguridad sean cercanos a 1, y que las superficies de falla atraviesen lo más cercano posible a los puntos pico de desplazamiento registrados. Lo anterior se analizará mediante el programa SLIDE Versión 5.014 (2004) de Rocscience Inc, empleando el método de equilibrio límite y las ecuaciones que cumplen con el equilibrio de momentos.

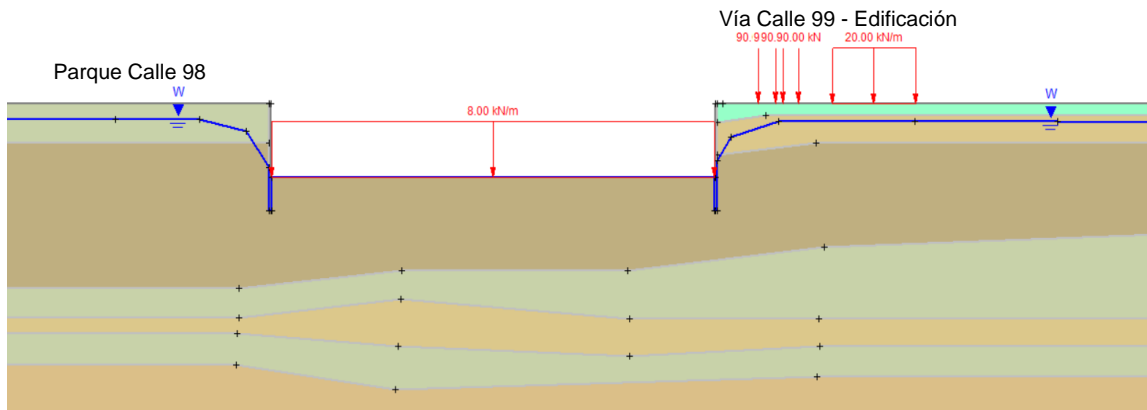
A continuación, se presenta la configuración de cada sección de análisis modelada (Figura 6-4 y Figura 6-5), donde se han dispuesto los elementos como las cargas de tráfico y de edificaciones vecinas; para la configuración de la excavación se ha dispuesto de fronteras de material para simular las pantallas y su espesor, así como de cargas uniformemente distribuida como peso de la losa de entepiso.

**Figura 6-4:** Configuración de la Sección de análisis 1 - Slide.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-5:** Configuración de la Sección de análisis 2 - Slide.



Fuente: Elaboración propia

Respecto a los análisis probabilísticos se hizo la verificación del comportamiento geotécnico para las secciones estudiadas. El análisis consistió establecer la caracterización estadística y probabilística de los parámetros de resistencia como el ángulo de fricción interna y la cohesión, así como del peso unitario de cada uno de los estratos presentes en el perfil (Augusto & Montoya, 2011). Esto se obtiene de la base de datos obtenida de los resultados de la investigación geotécnica de campo y de laboratorio

calculando las estadísticas de las variables geotécnicas, la media, desviación estándar y coeficiente de variación, todos los datos son tomados del estudio de la Universidad Nacional de Colombia y se presentan en la Tabla 6-2.

**Tabla 6-2:** Estadísticas de las variables geotécnicas.

<b>MATERIAL</b>	$\phi'_{\min}$ (°)	$\phi'_{\max}$ (°)	$\phi'_{\text{prom}}$ (°)	$\phi'_{\text{moda}}$ (°)	<b>Desv. Est.</b> $\sigma$ (°)	<b>c.o.v.</b>
M1: MATERIAL SUPERFICIAL	21.521	24.046	22.795	23.214	0.421	1.8%
M2: ARCILLA BLANDA A	21.294	25.191	22.271	23.917	0.649	2.9%
M3: ARCILLA MUY BLANDA	17.732	20.068	18.908	19.297	0.389	2.1%
M4: ARENA	30.283	36.885	33.711	33.988	1.100	3.3%
M5: COLUVION Y RESIDUAL	37.140	44.753	41.167	41.434	1.269	3.1%

<b>MATERIAL</b>	$c'_{\min}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$c'_{\max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$c'_{\text{prom}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$c'_{\text{moda}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	<b>Desv. Est.</b> $\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	<b>c.o.v.</b>
M1 MATERIAL SUPERFICIAL	0.000	49.999	24.999	33.333	8.333	33%
M2 ARCILLA BLANDA A	0.000	7.580	3.790	5.053	1.263	33%
M3 ARCILLA MUY BLANDA	0.000	9.457	4.728	6.305	1.576	33%
M4 ARENA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
M5 COLUVION Y RESIDUAL	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-

<b>MATERIAL</b>	$\gamma_{\min}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{\max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{\text{prom}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{\text{moda}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	<b>Desv. Est.</b> $\sigma$ (kN/m <sup>3</sup> )	<b>c.o.v.</b>
M1 MATERIAL SUPERFICIAL	14.565	17.390	15.973	15.973	0.471	2.9%
M2 ARCILLA BLANDA A	10.950	20.020	14.867	14.867	1.512	10.2%
M3 ARCILLA MUY BLANDA	11.317	17.914	13.386	13.386	1.100	8.2%
M4 ARENA	14.759	20.484	17.817	17.817	0.954	5.4%
M5 COLUVION Y RESIDUAL	16.525	20.710	18.461	18.461	0.698	3.8%

Fuente: Estudio Unal

Las estadísticas de las variables geotécnicas se ajustaron a funciones de distribución de probabilidad continuas de tipo triangular, que permite el conocimiento de los valores máximos, mínimos y del resultado más probable de las variables (Maia & Assis, 2004a). Para la estimación de la probabilidad de falla del modelo se usó la técnica de simulación de Monte Carlo, para calcular un modelo de comportamiento de acuerdo con la distribución de probabilidad continua de las variables y la función objetivo que es el factor de seguridad

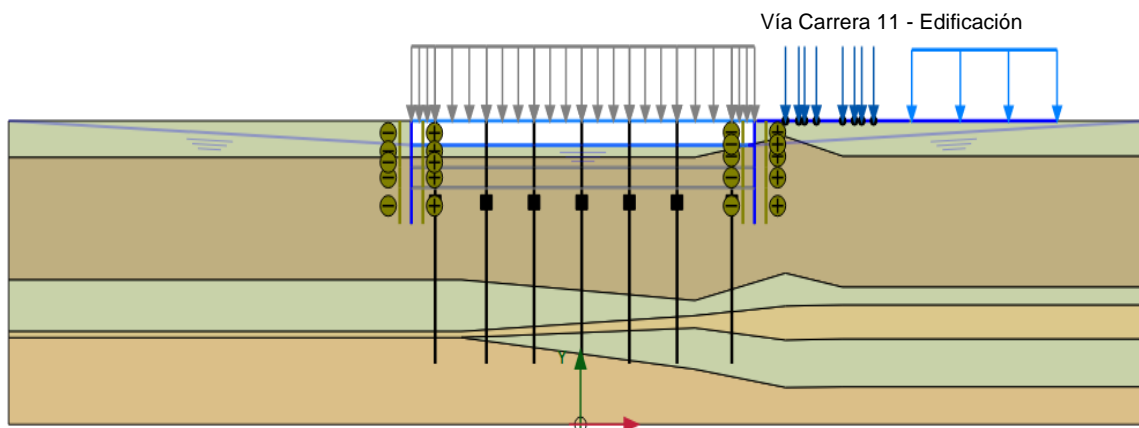
calculado mediante la metodología de equilibrio límite y las ecuaciones de Bishop (Maia & Assis, 2004b).

### **6.3 Análisis de deformaciones**

Con el fin de conocer las condiciones que llevaron a las deformaciones en el caso de estudio se modela la excavación y los elementos del entorno en el software de elementos finitos Plaxis 2D, representando el estado de esfuerzos y deformaciones generadas en el área debido al proceso constructivo de los elementos que conforman la excavación. El modelo se estableció con un nivel freático a 3m desde la superficie, los elementos de concreto se configuraron con un módulo elástico de 18000 MPa, las cargas de las edificaciones aledañas se estimaron con un valor de 20kN/m<sup>2</sup> y para la del edificio Green Office se evaluó en 21kN/m<sup>2</sup>, respecto a las cargas de flujo vehicular sobre las vías adyacentes se modelaron como cargas puntuales de 90 kN.

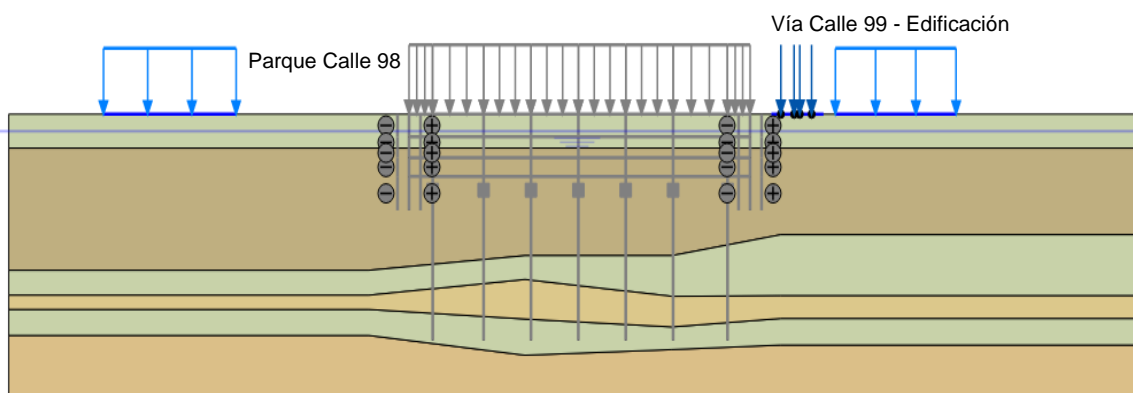
El criterio de falla para los materiales del perfil estratigráfico es el de Mohr-Coulomb y los modelos constitutivos están basado en modelos de esfuerzo deformación en el rango elástico en el intervalo de pequeñas deformaciones (Brinkgreve, 2005). En el modelo de Mohr –Coulomb, la superficie de fluencia es fija y no es influenciada por las deformaciones plásticas, por lo que cualquier estado de esfuerzos por dentro de la superficie se encuentra es estado elástico. Se considero el modelo constitutivo Soft Soil Model para los materiales arcillosos, donde la rigidez depende del estado de esfuerzos, la distinción entre carga primaria y trayectorias de descarga –recarga y el esfuerzo de preconsolidación(Obrzud, 2010), sin embargo, no se contaban con la información suficiente que permitiera obtener los parámetros que el modelo requiere. En la Figura 6-6 y Figura 6-7 se presenta la configuración de las secciones de análisis en el software Plaxis.

**Figura 6-6:** Configuración de la Sección de análisis 1- Plaxis.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-7:** Configuración de la Sección de análisis 1- Plaxis.



Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de compresibilidad del suelo se escogieron a partir de los resultados de los ensayos de consolidación unidimensional y los valores del coeficiente de presión de tierras en reposo de la relación de sobreconsolidación del material, estos se obtuvieron a partir del ensayo in situ CPTU.

Los elementos estructurales como las placas fueron definidos con rigidez a la flexión  $EI$  de  $1,68 \times 10^6$   $\text{kNm}^2/\text{m}$  y rigidez a esfuerzos normales  $EA$  de  $126 \times 10^6$   $\text{kN/m}$  y son representadas con líneas horizontales azules. Las propiedades de la pantalla son  $EI$  de

$7,7 \times 10^6$  kNm<sup>2</sup>/m y rigidez a esfuerzos normales EA de  $577 \times 10^6$  kN/m y son representadas con líneas verticales azul oscuro.

Para la configuración de los elementos finitos se seleccionaron elementos triangulares de 15 nodos, es decir, se dividió en clústeres triangulares con 15 puntos internos donde se aplicó el respectivo procedimiento matemático para calcular los esfuerzos. La malla se seleccionó con la mayor densidad posible de elementos dentro del modelo y con un refinamiento automático en los contornos de las estructuras e interfaces de estratos de suelo.

Para modelar las presiones de poro se supuso la línea de nivel freático dependiendo de la información obtenida. Estos modelos se calculan en condiciones drenadas y no se tiene incrementos de presión de agua debidos a los cambios de esfuerzos.



## **7. Definición de parámetros de resiliencia de la excavación**

Como se presentó en capítulos anteriores la resiliencia en infraestructura se compone de cuatro parámetros denominados 4Rs. En este capítulo se describen los criterios considerados que permiten un acercamiento de medición para la robustez, redundancia, capacidad de gestión, y recuperación del sistema conformado por la excavación y su entorno, establecidos acorde a las definiciones de cada uno de los parámetros y enfocadas a las características del evento disruptivo que para este caso de estudio corresponde a la falla de fondo en la excavación para los sótanos del edificio Green Office.

Una vez definidos los criterios se establecen las condiciones de los sistemas de lógica difusa que permiten la evaluación de los criterios definidos para cada parámetro de resiliencia. Se presenta las variables de entrada que corresponden a los criterios establecidos de cada parámetro y como variable de salida el parámetro de resiliencia; cada uno con las respectivas variables lingüísticas, universo de discurso, términos lingüísticos y funciones de membresía; todas las funciones de membresía son de tipo triangular que de acuerdo con referencias bibliográficas son las funciones que mejor representan los conjuntos difusos para la inferencia (Asadi, 2016; Azarafza et al., 2021; V, 2000). Finalmente, para completar el sistema de inferencia difusa se presentan las reglas “Si\_Entonces” que permite construir la base de conocimiento con el que el sistema va a operar siguiendo metodología de inferencia de Mamdani.

Respecto a las funciones de membresía se probaron funciones sigmoideas y campana de gauss que podían adaptarse mejor a los criterios considerados, sin embargo, después de un análisis de sensibilidad se determinó que no se obtenía el comportamiento de la superficie de conocimiento o superficie de control deseado, ya que al cambiar variables de

entrada no se reducía el cambio correspondiente en la variable de salida, de manera que se pudiera comprobar el operador de la inferencia seleccionado.

## 7.1 Robustez

De acuerdo con las definiciones dadas en el marco de evaluación de la resiliencia propuesto en la Tabla 3-1, uno de los objetivos es simular los escenarios de peligro tenido por las presiones y cuantificar las respuestas del entorno evaluado en términos de sus estados límites bajo las posibles amenazas identificadas, en este caso específico en una excavación en entorno urbano. Por tanto, este criterio busca determinar la reacción del sistema frente a un evento, dadas por la estabilidad general del fondo de la excavación y la estabilidad de las paredes de esta.

Teniendo en cuenta que las fallas en una excavación pueden ser ocasionadas por dos factores:

- Factores preexistentes: Dadas por las características de medio geológico, Comportamiento mecánico del medio geológico, el perfil geotécnico, el estado de esfuerzos in-situ, el nivel freático y condiciones de flujo, cambio en la presión de poros y error humano en modelos erróneos del suelo por una exploración insuficiente o incluso inexperiencia en el comportamiento de los suelos locales.
- Factores propios de la excavación o posteriores: Pueden darse por la redistribución de esfuerzos generados después de la excavación, el diseño dimensional (tamaño, extensión, forma, y orientación de las excavaciones), diseño y ejecución de las etapas constructivas (carácter dinámico).

Se consideran que los estados límites definidos por la NSR-10, el Estado Limite Ultimo (ELU) y el Estado Limite de Servicio (ELS), abarcan los factores detonantes y se pueden evaluar mediante el análisis de estabilidad general de la excavación, calculando el factor de seguridad y la probabilidad de falla de fondo por cortes y subpresiones de las capas inferiores del suelo, y la estabilidad de estructuras vecinas verificada por las fallas en la cimentación para el caso de ELU; y para el ELS mediante el cálculo de las deformaciones

en el sistema y comparándolas con las máximas permitidas y las afectaciones que están representan para el entorno. En consecuencia, la robustez de la estructura geotécnica puede analizarse mediante el estado límite último (ULS) y el estado límite de servicio (SLS), por medio de análisis geotécnicos que permiten visibilizar los cambios en cada estado limite causados por los escenarios de peligro generados por las presiones determinadas en la Tabla 3-1. En la Tabla 7-1 se presenta el análisis geotécnico para los escenarios de peligro en cada estado limite mencionado.

**Tabla 7-1:** Análisis geotécnico para los escenarios de peligro.

Estado Limite	Escenario de Peligro	Análisis geotécnico
ELU	Falla de Fondo	Factor de seguridad Probabilidad de Falla.
	Deslizamiento	
ELS	Deformaciones excesivas	Deformaciones por análisis en elementos finitos.

Fuente: Elaboración propia

Para establecer la influencia de los estados límites de la excavación se crearán modelos de análisis en las dos secciones mostradas en la Figura 6-2 y Figura 6-3.

En este caso se estima que los análisis geotécnicos deben calcularse bajo distintos escenarios como la dimensión de los elementos, el perfil geológico geotécnico, niveles de agua y métodos constructivos de acuerdo con la solución planteada para la contención y los materiales encontrados (Li et al., 2016),(Williams et al., 2005). Con el fin de establecer la influencia de los elementos que conforman la excavación en los resultados del factor de seguridad y la probabilidad de falla, se realiza el modelo variando la distribución geométrica de la pantalla de contención, la cual se establece en el diseño origina con un ancho de 40 cm y una longitud de 17 m, también se varía el sistema constructivo, representado por la carga en la excavación, donde 8 kN/m representa la presión de la primera losa y 16 kN/m el peso de la segunda. A continuación, se muestra la tabla resumen con las variaciones asumidas para los análisis.

**Tabla 7-2:** Escenarios modelados para el análisis.

Condición	Longitud de pantalla (m)	Carga en la excavación (kN/m)	Ancho de Pantalla (m)
1. Longitud de pantalla original – excavación de 1 sótano	17	8	0,40
2. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 1 sótano	16	8	0,40
3. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 1 sótano	21	8	0,40
4. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 1 sótano	25	8	0,40
5. Longitud de pantalla original – excavación de 2 sótanos	17	16	0,40
6. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 2 sótanos	16	16	0,40
7. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 2 sótanos	21	16	0,40
8. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 2 sótanos	25	16	0,40
9. Longitud de pantalla original – excavación de 1 sótano	17	8	0,60
10. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 1 sótano	16	8	0,60
11. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 1 sótano	21	8	0,60
12. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 1 sótano	25	8	0,60
13. Longitud de pantalla original – excavación de 2 sótanos	17	16	0,60
14. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 2 sótanos	16	16	0,60
15. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 2 sótanos	21	16	0,60
16. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 2 sótanos	25	16	0,60
17. Longitud de pantalla original – excavación de 1 sótano	17	8	0,80
18. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 1 sótano	16	8	0,80
19. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 1 sótano	21	8	0,80
20. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 1 sótano	25	8	0,80
21. Longitud de pantalla original – excavación de 2 sótanos	17	16	0,80
22. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 2 sótanos	16	16	0,80
23. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 2 sótanos	21	16	0,80
24. Cambio en longitud de pantalla – excavación de 2 sótanos	25	16	0,80

Fuente: Elaboración propia

### 7.1.1 Factores de seguridad

Para el análisis de factor de seguridad se debe tener claro el mecanismo de falla presentado en el sistema de la excavación para cada sección. De acuerdo con la información del estudio de la Universidad Nacional, en la carrera 11 se presentó un hundimiento debido a la desequilibrio de fuerzas entre el peso del suelo y la resistencia cortante del mismo, dando lugar a una falla de fondo por capacidad portante originando desplazamientos de suelo en el fondo de la excavación, al igual que en la sección 2, donde se evidencian las características de una falla de fondo, con deformaciones en superficie y levantamientos en el fondo de la excavación, según esto, se proyectó que las superficies de falla fueran similares en gran medida a las tenidas en la realidad.

Los resultados de los Factores de seguridad para los 24 escenarios (para cada sección) presentan el comportamiento esperado conforme se incrementa las dimensiones de la pantalla, así como el espesor. También se ve un aumento en los valores cuando en la excavación se tienen presiones mayores, por las losas de sobre piso. En la Tabla 7-3 y la Figura 7-1 se presentan los resultados obtenidos; los modelos de Slide de los 24 escenarios se presentan en el Anexo A.

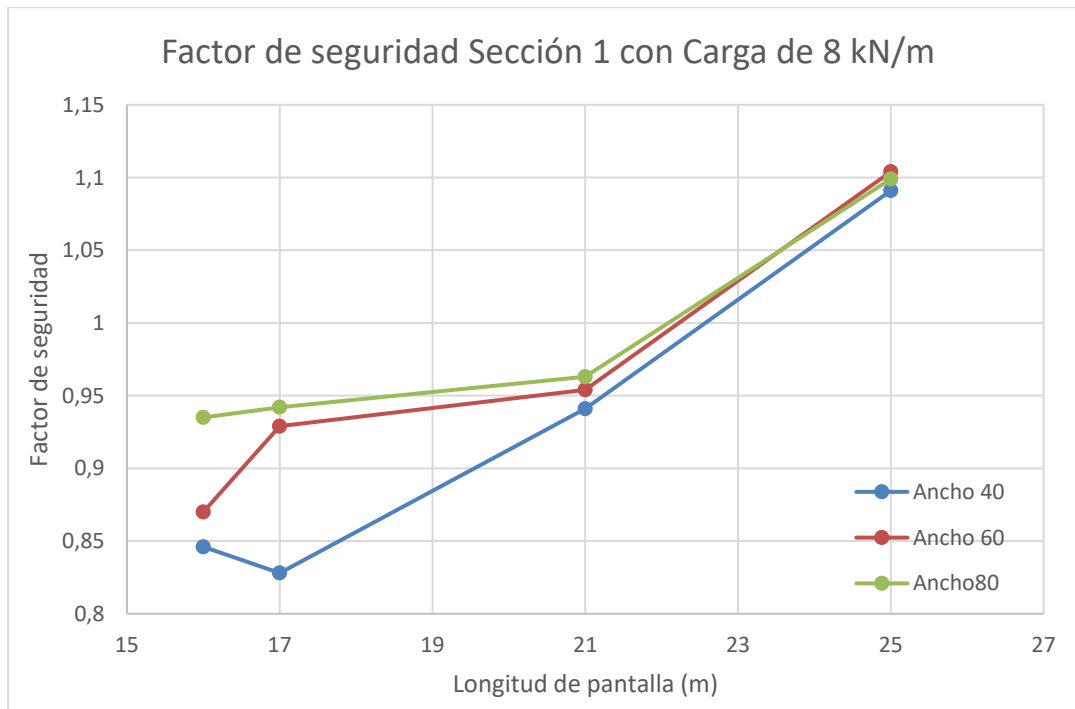
**Tabla 7-3:** Factores de seguridad de los escenarios modelados

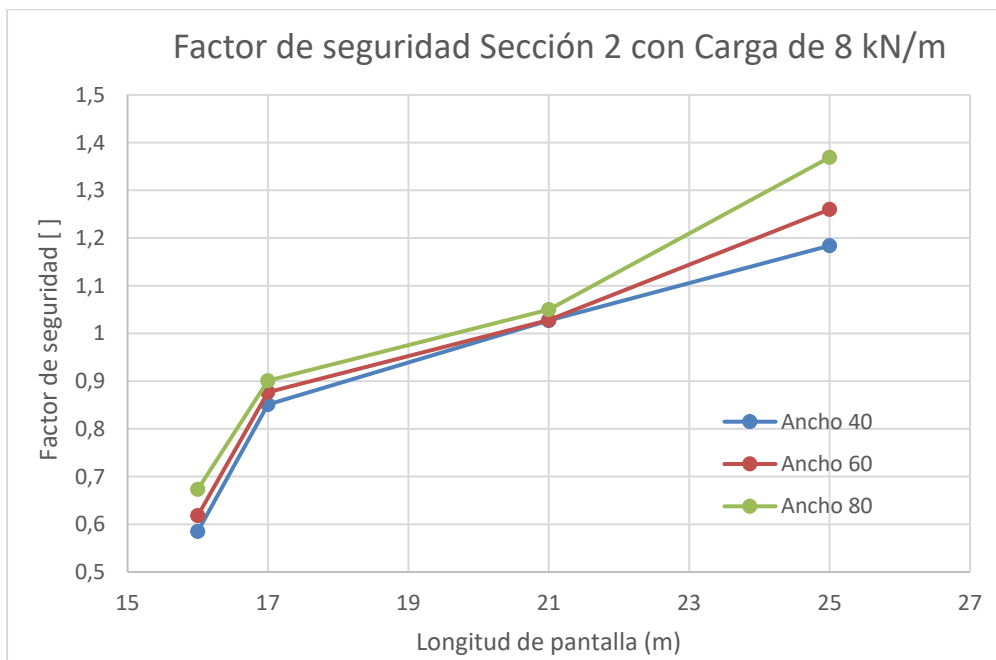
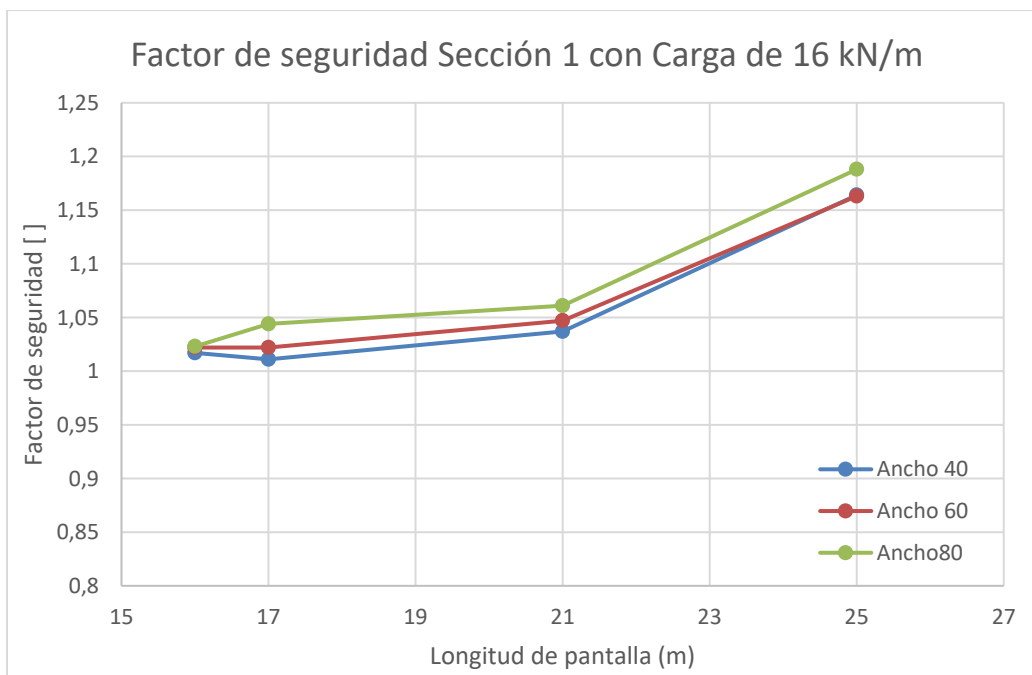
Ancho pantalla (m)	carga kN/m	Pantalla (m)	Sección 1	Sección 2
			FS (determinístico)	FS (determinístico)
40	8	16	0,846	0,585
		17	0,828	0,851
		21	0,941	1,027
		25	1,091	1,184
	16	16	1,017	0,724
		17	1,011	0,734
		21	1,037	1,436
		25	1,164	0,724
60	8	16	0,87	0,618
		17	0,929	0,877
		21	0,954	1,028
		25	1,104	1,26
	16	16	1,022	0,799
		17	1,022	0,944
		21	1,047	1,149

Ancho pantalla (m)	carga kN/m	Pantalla (m)	Sección 1	Sección 2
			FS (determinístico)	FS (determinístico)
		25	1,163	1,664
80	8	16	0,935	0,673
		17	0,942	0,901
		21	0,963	1,05
		25	1,099	1,369
	16	16	1,023	0,916
		17	1,044	0,948
		21	1,061	1,153
		25	1,188	1,45

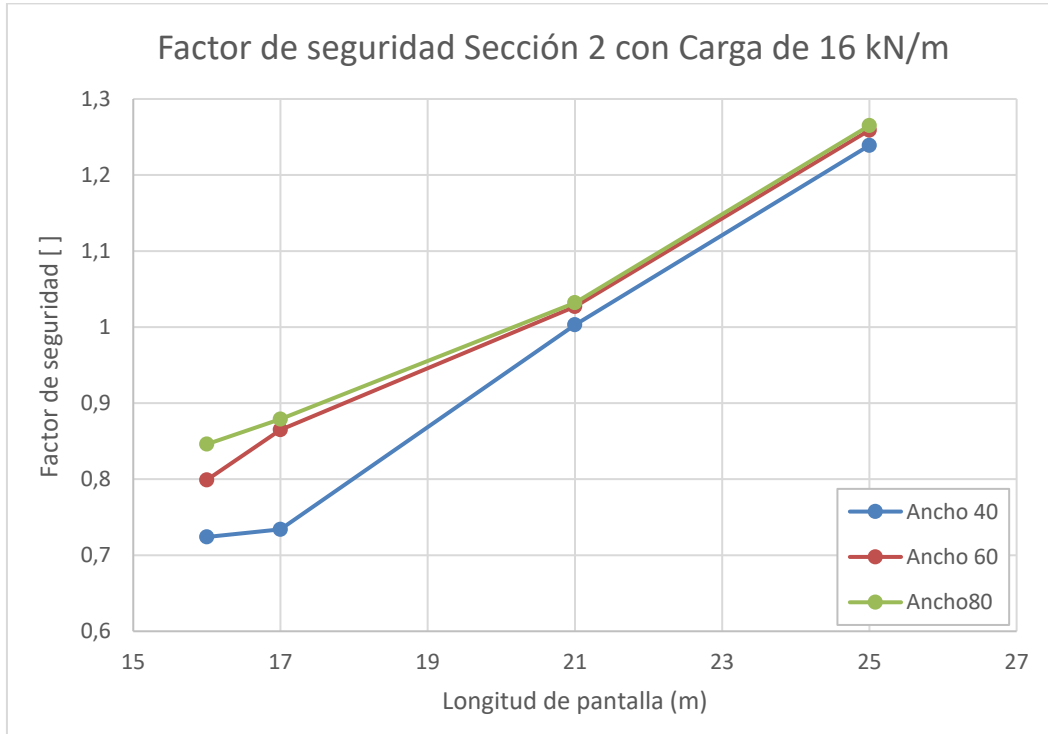
Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-1:** Variación del factor de seguridad en sección 1 - carga 8 kN/m



**Figura 7-2:** Variación del factor de seguridad en sección 2 - carga 8 kN/m**Figura 7-3:** Variación del factor de seguridad en sección 1 - carga 16 kN/m

**Figura 7-4:** Variación del factor de seguridad en sección 2 - carga 16 kN/m



Como se puede ver el cambio en la geometría de la estructura de contención, da como resultado cambios importantes en el factor de seguridad. Se evidencia que, al incrementar la geometría de las pantallas en longitud y grosor, además de las presiones ejercidas por la losa de entrepiso en la excavación, se tiene un incremento en el factor de seguridad del sistema, ya que estas aportan a la estabilidad de la excavación por el equilibrio de fuerzas generadas en la misma (Li et al., 2016),(Olaya, 2015a). Por tanto, es preciso mencionar que al incrementar el factor de seguridad la excavación presenta una mayor robustez, dado que al incrementar las características dimensionales de los elementos que la conforman se puede tener una mayor capacidad de absorción ante el impacto de un evento.

De acuerdo con los análisis cinemáticos de equilibrio límite, el FS debe ser mayor a 1 para considerar una condición estable del terreno, por el contrario, si es menor o igual a 1, se entiende que el terreno ha fallado o que su condición de estabilidad es crítica. Entonces para el criterio "Factor de seguridad" se establece que los valores que implican un aumento o disminución de la Robustez están determinados por el límite  $FS \leq 1$ , por lo tanto, se



---

consideran tres niveles de estabilidad, Estable para  $FS > 1$ , Equilibrio Limite para  $FS = 1$  e Inestable para  $FS < 1$ .

### **Parámetros de lógica difusa para el factor de seguridad**

El factor de seguridad debe ser siempre mayor a 1 para que el sistema sea estable, en este caso para la excavación, se tiene que cumplir con los factores de seguridad mínimos directos para el análisis geotécnico de acuerdo con la NSR-10, donde se establece que en la etapa constructiva debe ser al menos 1.2, y a largo plazo mínimo 2.0. Teniendo esto en cuenta, se ha definido el universo de discurso para la variable lingüística “factor de seguridad” en un intervalo de 0 a 2. Se han definido tres términos lingüísticos con funciones de membresía triangular que representa el comportamiento por medio de una relación directa, es decir, a medida que aumenta el factor de seguridad la robustez del sistema incrementa. Los términos lingüísticos, son representados por la estabilidad, donde Estable, describe un sistema con factor de seguridad mayor a 1, Equilibrio Limite con F.S. de 1 y consistentemente inestable representa valores por debajo de 1. La configuración del sistema difuso se presenta en la Tabla 7-8.

Para el cálculo de Robustez basta con poner el valor calculado de los modelos en el sistema de lógica difusa ya que las funciones de membresía se han establecido en un rango que acepta factores de seguridad hasta 2.

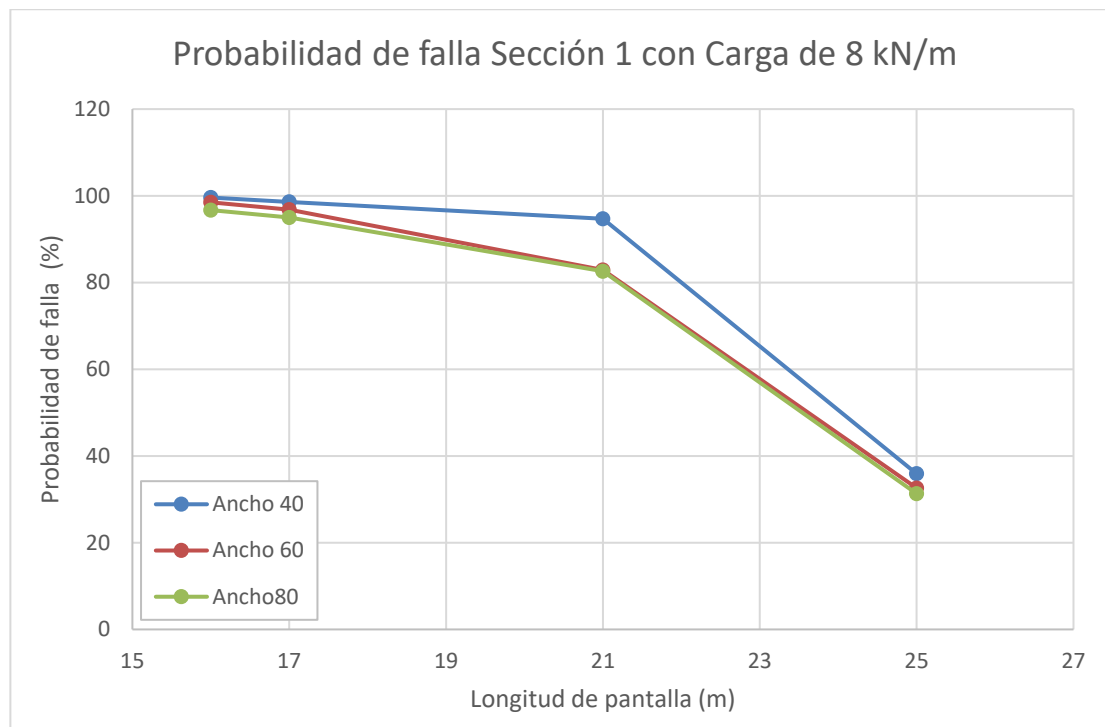
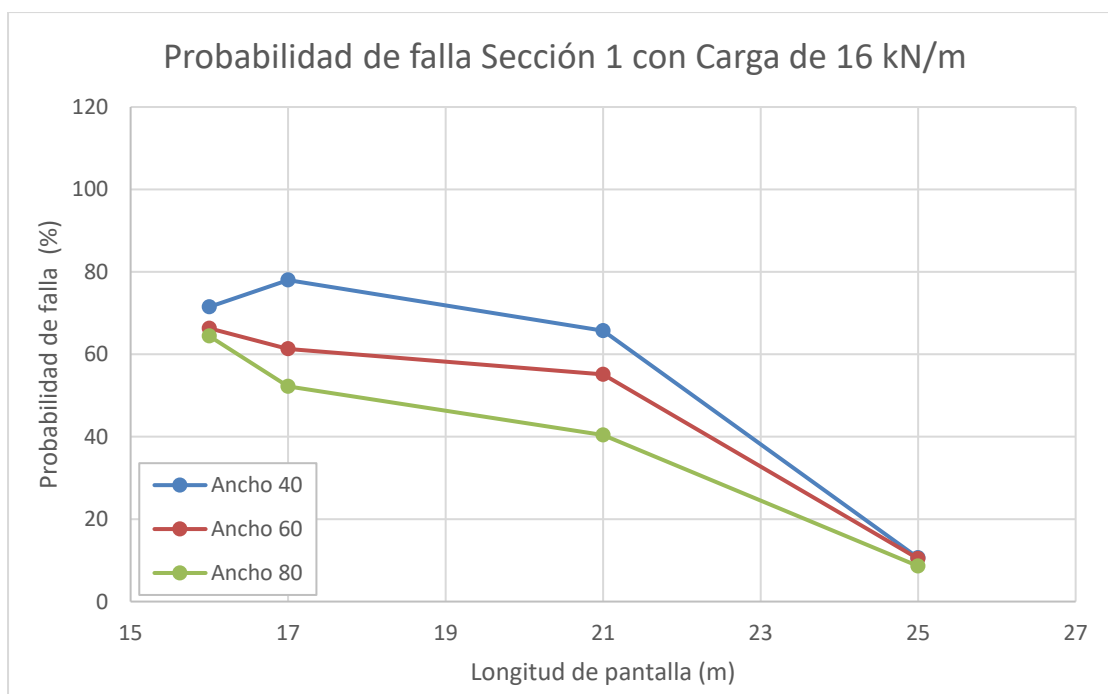
### **7.1.2 Probabilidad de falla**

Para determinar la influencia de la probabilidad de falla en la Robustez se modelan los escenarios de la Tabla 7-2, bajo las características mencionadas en el numeral 6.2. A continuación, se presentan una tabla resumen con los resultados de la probabilidad de falla de los análisis probabilísticos de estabilidad por métodos de equilibrio límite para los modelos de la excavación hechos en el software SLIDE. Los resultados completos de la modelación se presentan en el Anexo A.

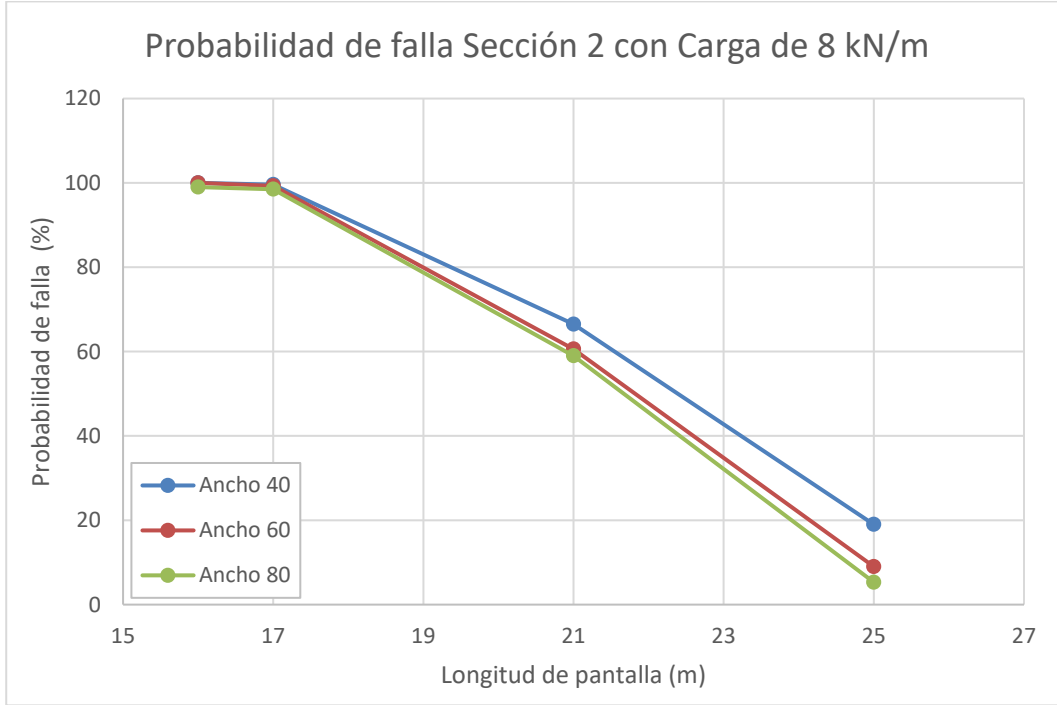
**Tabla 7-4:** Probabilidad de falla de los escenarios modelados.

Ancho pantalla (cm)	carga kN/m	Pantalla (m)	Sección 1		Sección 2	
			Probabilidad de falla	Índice de confiabilidad (normal)	Probabilidad de falla	Índice de confiabilidad (normal)
40	8	16	95,4	-3,07	100	-13,98
		17	97,3	-2,288	99,6	-3,052
		21	56,2	-1,565	66,5	-0,466
		25	15,2	0,363	19	0,871
	16	16	18,5	-0,608	100	-6,561
		17	20,3	-0,785	100	-7,858
		21	13,1	-0,453	28,7	0,603
		25	5	1,261	2,5	1,978
60	8	16	92,8	-2,186	100	-13,889
		17	63	-1,857	99,3	-2,74
		21	49,3	-0,93	60,6	-0,269
		25	13,8	0,451	9	1,336
	16	16	17,3	-0,477	100	-4,825
		17	18,3	-0,288	91,3	-1,339
		21	11,7	-0,138	22,1	0,816
		25	5	1,289	2,1	2,091
80	8	16	60,4	-1,836	99	-10,052
		17	53,6	-1,636	98,5	-2,325
		21	45,6	-0,935	59	-0,23
		25	14,7	0,491	5,3	1,639
	16	16	15,5	-0,389	96,8	-1,915
		17	11,7	-0,04	88,1	-1,172
		21	9,9	0,235	19,9	0,885
		25	3,3	1,381	1,9	2,129

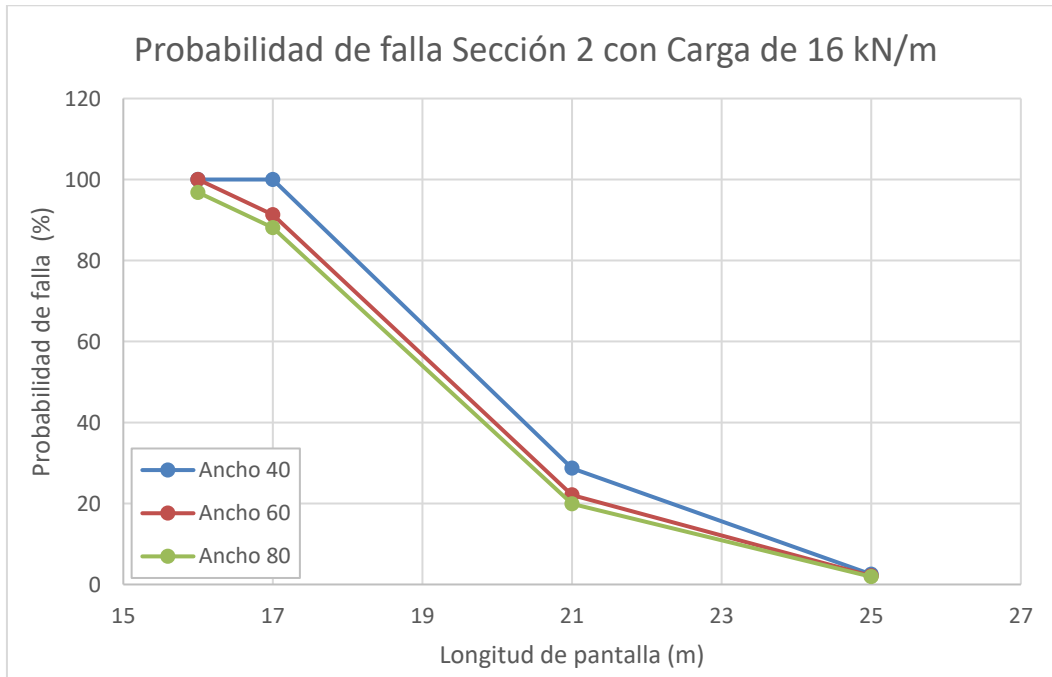
Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-5:** Variación de la probabilidad de falla sección 1 - carga 8 kN/m.**Figura 7-6:** Variación de la probabilidad de falla sección 1 - carga 16 kN/m.

**Figura 7-7:** Variación de la probabilidad de falla sección 2 - carga 8 kN/m.



**Figura 7-8:** Variación de la probabilidad de falla sección 2 - carga 16 kN/m.



De manera similar a los resultados de factor de seguridad, la probabilidad de falla es indicativo que, al tener una configuración de elementos más robusta, la estructura de la excavación puede tener una mayor capacidad de resistir los efectos adversos de un estado limite ultimo como lo es la falla de fondo. Por tanto, se puede establecer que los valores de la probabilidad de falla influyen directamente en los niveles de Robustez del sistema a analizar.

### **Parámetros de lógica difusa para la probabilidad de falla**

De acuerdo con los resultados del numeral anterior, donde se pudo determinar que la probabilidad de falla influye en la capacidad que podría tener la excavación de resistir un evento, en el sistema difuso se ha determinado una relación inversa con la Robustez, es decir, que cuando la probabilidad de falla aumenta, la Robustez disminuye. En el modelo difuso se ha definido el universo de discurso de la variable lingüística "Probabilidad de falla" en un intervalo de 0 a 20, basado en que tanto en la NSR-10 como otros autores (Cheng & Lau, 2008), (Goh et al., 2008), (Augusto & Montoya, 2011; Maia & Assis, 2004a) concuerdan que una probabilidad de falla aceptable se encuentra entre 1 a 10%. Por lo tanto, al igual que para el factor de seguridad, se tiene tres términos lingüísticos Estable, para probabilidades entre 0 y 10%, Equilibrio Limite para las probabilidades de 15% e Inestable para probabilidades mayores a 15%. Se aclara con el valor admisible de probabilidad de falla que las funciones de membresía dan un valor de pertenencia al conjunto difuso de la variable lingüística, esto quiere decir que de acuerdo con la característica y relación dadas al parámetro se tiene una relación directa o indirecta con la variable de entrada. Específicamente para el termino lingüístico "no falla" de la variable lingüística "probabilidad de falla" si el valor se acerca al límite que es 10 el sistema asigna un nivel de pertenencia menor al termino "no falla" y de manera paralela, asigna un valor de pertenencia mayor al termino "Equilibrio", el cual no significa que el sistema sea seguro.

### **7.1.3 Análisis de deformaciones**

El ELS se puede establecer calculando las deformaciones admisibles de la excavación y su entorno, reconociendo en primera instancia las expansiones instantáneas o las deformaciones excesivas por movimientos verticales y horizontales por la descarga en los esfuerzos en la excavación y en segunda por los asentamientos del terreno natural adyacente a las excavaciones.

El análisis de deformaciones por elementos finitos en el software Plaxis es posible reflejar las etapas constructivas de la excavación, sin embargo en este proyecto no se tiene información que aclare la secuencia constructiva ejecutada en obra, por lo que en este trabajo se han definido dos métodos constructivos, el primero consiste en realizar de manera íntegra las pantallas y pilotes para luego realizar la excavación completa y sistemática de los tres sótanos del proyecto y la segunda consiste en realizar las excavaciones en dos etapas para cada sótano.

**Tabla 7-5:** Etapas constructivas consideradas en los modelos de Plaxis.

Método Constructivo 1	
Etapa	Descripción
1	Se establecen las condiciones originales del suelo sin considerar las deformaciones por las cargas de las edificaciones aledañas y las vías.
2	Se definen en el modelo las pantallas y los pilotes.
3	Se excava el primer nivel del sótano y se construye la placa de fondo.
4	Se excava el segundo nivel del sótano y se construye la placa de fondo.
5	Se excava el tercer nivel de excavación y se construye la placa de fondo y se aplican las cargas de la edificación.
Método Constructivo 2	
1	Se establecen las condiciones originales del suelo sin considerar las deformaciones por las cargas de las edificaciones aledañas y las vías.
2	Se excava las secciones perimetrales del primer sótano.
3	Se excava la sección central del primer sótano y se construye la placa de fondo.
4	Se excava las secciones perimetrales del segundo sótano.
5	Se excava la sección central del segundo sótano y se construye la placa de fondo.
6	Se excava las secciones perimetrales del tercer sótano.
7	Se excava la sección central del tercer sótano y se construye la placa de fondo.
8	Se aplican las cargas del edificio Green Office.

Fuente: Elaboración propia

Para simplificar el análisis se ha decidido modelar solo las longitudes de pantalla de 17 y 25 metros de profundidad, que corresponden respectivamente a la longitud original del proyecto y la profundidad que en los modelos de estabilidad conllevo a factores de seguridad y probabilidad de falla aceptables. En la **Tabla 7-6** se presenta el resumen de los resultados de deformaciones en la sección 1.

**Tabla 7-6:** Desplazamientos totales en los modelos analizados (m).

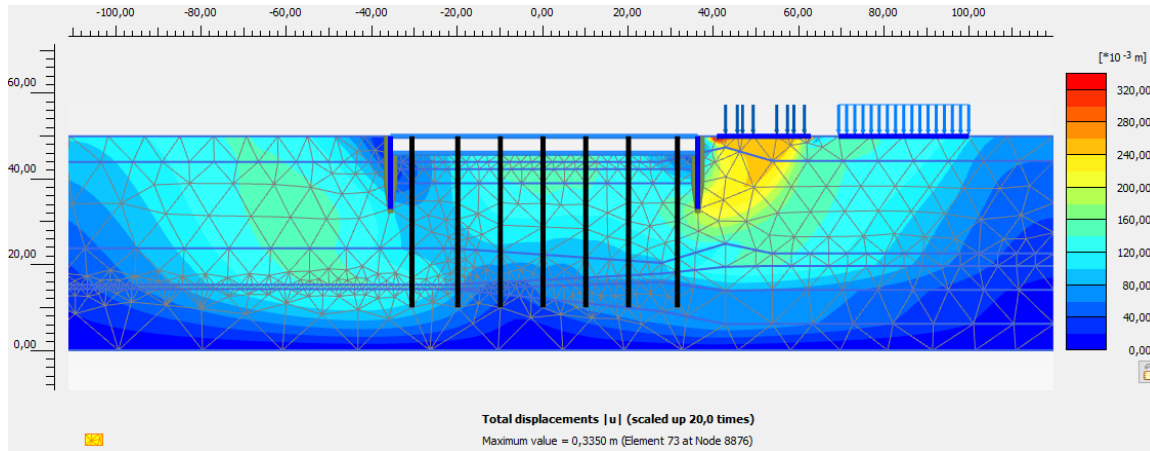
Método Constructivo		L=17 m	L=25 m
1	Etapa	Sección 1	Sección 1
	1	0,5998	0,7096
	2	0,1243	0,2614
	3	0,3350	0,2039
	4	0,6017	0,3500
	5	0,8067	0,4602
2	Etapa	Sección 1	Sección 1
	1	0,4880	0,6289
	2	0,1281	0,2615
	3	0,1345	0,2542
	4	0,2156	0,221
	5	0,2881	0,3032
	6	0,3932	0,3629
	7	0,5235	0,4816
	8	0,5867	0,5016

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que el sistema constructivo tiene influencia en las deformaciones inducidas por la excavación, pues en la Etapa 3 del método constructivo 1, donde se excava completamente el primer sótano, se tienen desplazamientos de alrededor 33 cm en comparación con los 21 cm de la excavación completa del primer sótano, pero hecha en dos etapas como se propone en el método constructivo 2. Lo anterior también se refleja en las deformaciones al finalizar la excavación del sótano 3, llegando a deformaciones del orden de 80 cm para el método 1 y hasta de 58 cm en el método 2.

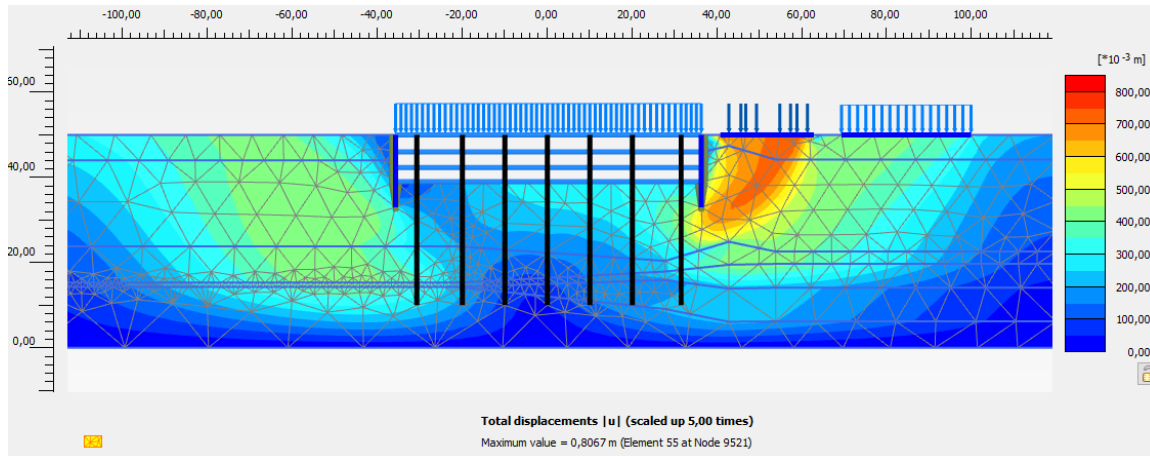
Respecto a la longitud de pantalla se puede concluir que una mayor longitud ayuda a controlar los desplazamientos inducidos por la excavación, como se puede ver los resultados de la Tabla 7-6, donde se presenta una disminución considerable de las deformaciones. En las figuras siguientes se presentan las deformaciones inducidas de acuerdo con la configuración de los modelos de análisis descritas anteriormente.

**Figura 7-9:** Excavación primer sótano – Método Constructivo 1.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Plaxis 2D

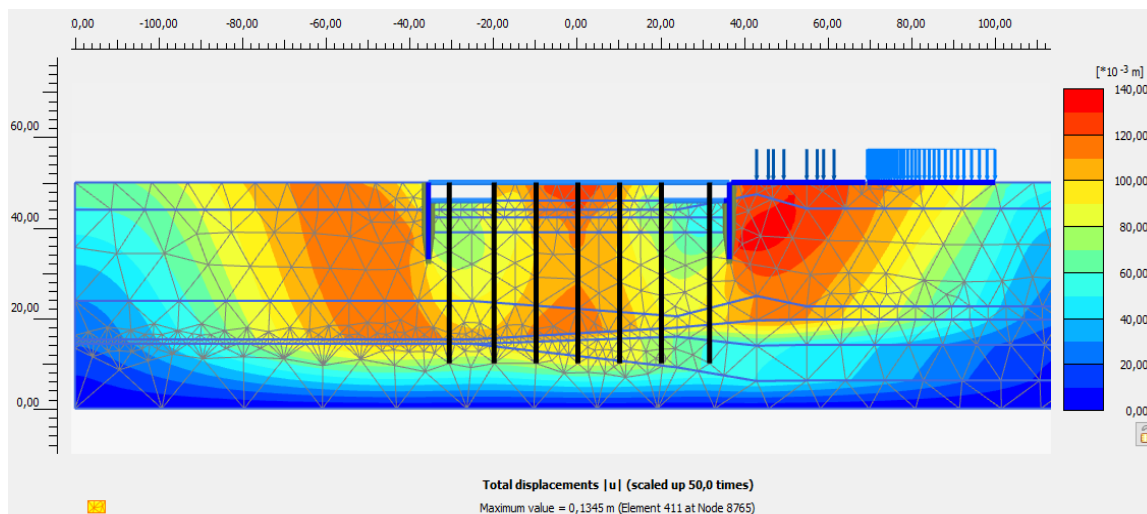
**Figura 7-10:** Excavación tercer sótano - Método Constructivo 1.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Plaxis 2D

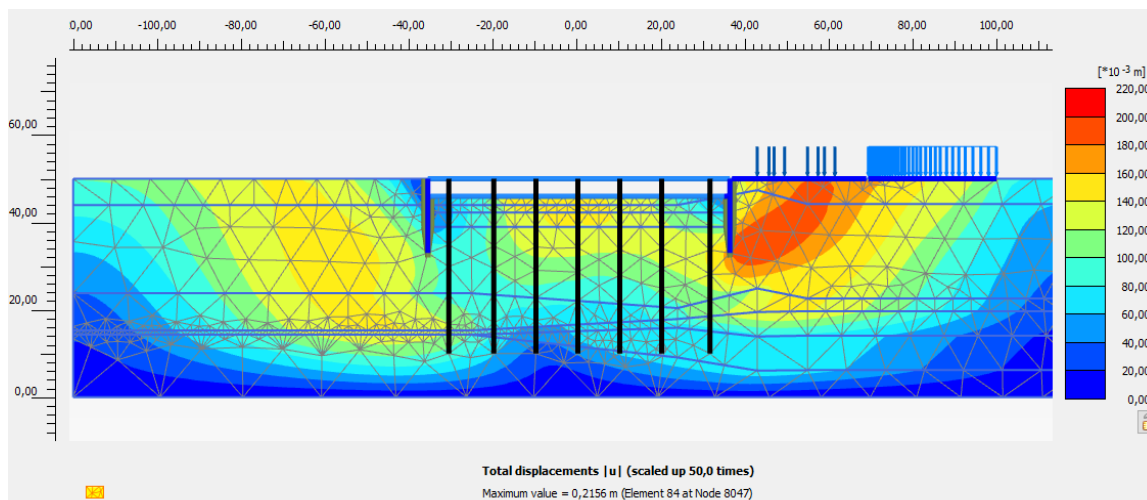


**Figura 7-11:** Primera etapa de la primera excavación – Método Constructivo 2.



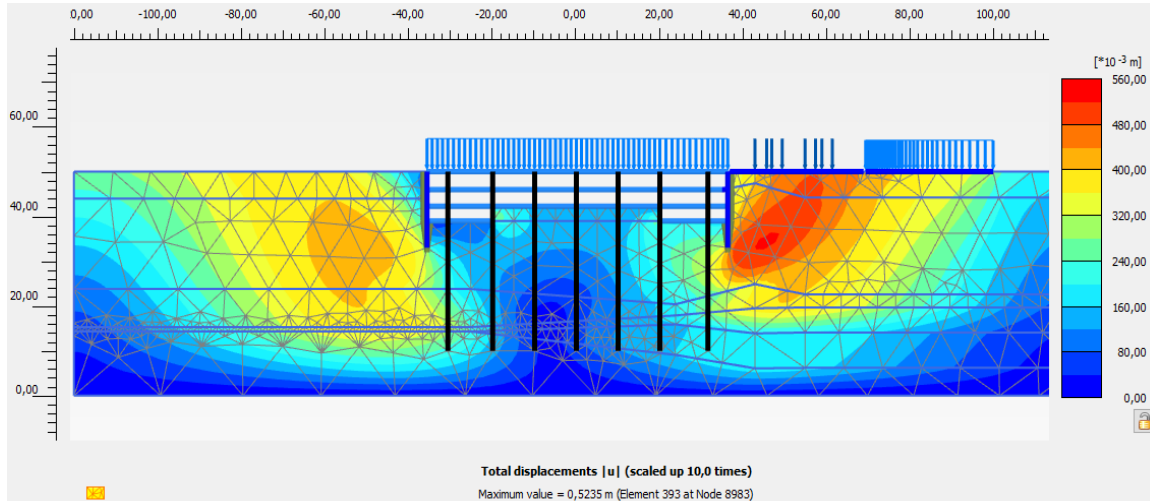
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Plaxis 2D

**Figura 7-12:** Segunda etapa de la primera excavación – Método Constructivo 2.



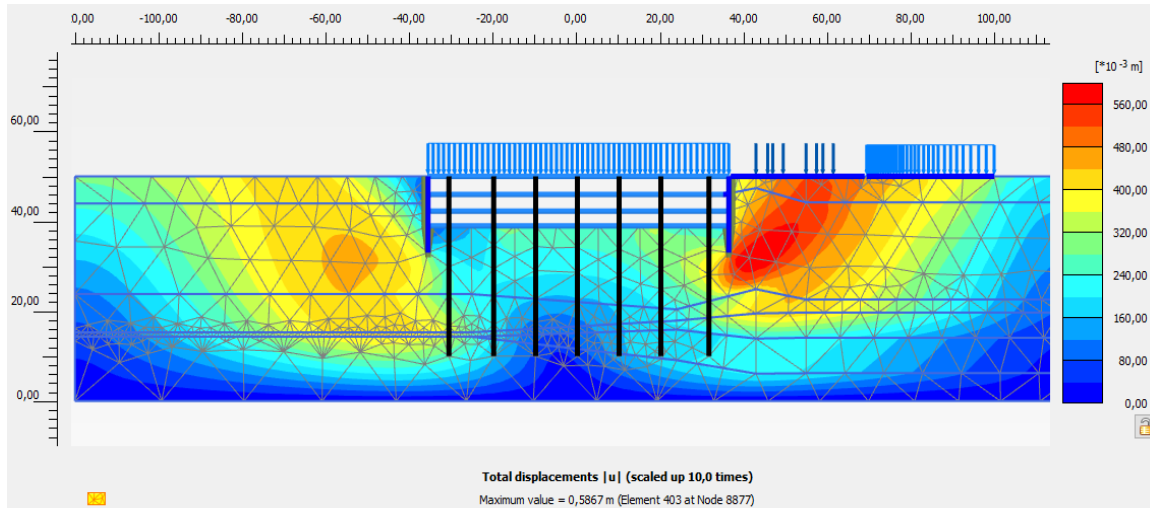
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Plaxis 2D

**Figura 7-13:** Primera etapa, tercera excavación – Método Constructivo 2.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Plaxis 2D

**Figura 7-14:** Segunda etapa, tercera excavación – Método Constructivo 2.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Plaxis 2D

De lo anterior es importante destacar dos aspectos, el primero es la influencia del método constructivo en los desplazamientos generados por el desarrollo de la excavación, pues como se presenta en los resultados de la modelación de los dos métodos se encuentran diferencias significativas en los desplazamientos totales. El segundo aspecto se refiere a

---

la influencia de los elementos que constituyen la excavación, pues en este caso el incremento en la profundidad de la pantalla significó reducción en los desplazamientos.

En conclusión, del numeral 7.1, se pudo demostrar que conforme a los resultados de los análisis de estabilidad por medio del análisis de equilibrio limite, es posible establecer una influencia directa entre la profundidad de la pantalla diseñada para la contención de la excavación, así como el grosor, siendo la longitud una característica determinante en el incremento de la estabilidad de la excavación en este caso específico, teniendo en cuenta las características del perfil estratigráfico donde se encuentra un estrato de espesor considerable de arcilla muy blanda con bajas características de resistencia y compresibilidad. Así mismo se comprobó la influencia del sistema constructivo y la configuración dimensional de los elementos de la excavación en los desplazamientos inducidos tanto en la excavación como en el entorno circundante de la misma.

En consecuencia, es conveniente afirmar que los criterios “factor de seguridad”, “probabilidad de falla” y “deformaciones” son criterios válidos para evaluar el parámetro de Robustez en el cálculo de resiliencia del sistema.

### **Parámetros de lógica difusa para las deformaciones**

De acuerdo con el estado límite de servicio (ELS), las deformaciones producto de la excavación deben ser lo suficientemente pequeñas para no generar afectaciones tanto en la excavación como en la infraestructura colindante (AIS & Territorial, 2010b). El desarrollo de deformaciones en la excavación y su entorno a medida que se lleva a cabo en el proceso constructivo puede dar indicios del avance hacia los estados límites de la excavación, para ello se realizan análisis de interacción suelo estructura donde se debe garantizar la compatibilidad de esfuerzos y deformaciones, con la ayuda de software de elementos finitos se pueden obtener las fuerzas actuantes sobre los elementos estructurales con mayor precisión con la correspondiente modelo constitutivo del suelo y bajo una condición plana de deformaciones (Olaya, 2015b)(Schweiger, 2010b).

Las deformaciones pueden ocurrir en el fondo o en las paredes de la excavación, por expansiones instantáneas debidas a la descarga, sin embargo, para simplificar el análisis en el modelo difuso, se ha considerado la variable lingüística “Desplazamientos en la

excavación” para evaluar el impacto sobre el parámetro de robustez de dichos desplazamientos, tomando el mayor entre los dos (de fondo o en paredes) de los obtenidos en modelo de elementos finitos y en la etapa posterior al evento disruptivo. El universo de discurso se tomó de 0 a 40 mm, con términos lingüísticos de acuerdo con el grado de severidad de los desplazamientos.

**Tabla 7-7:** Relación entre robustez y desplazamientos de la excavación.

Nivel de Robustez	Grado de Severidad	Valores de referencia (mm)	Valor en la cuantificación
Alto	Severidad Baja	0-10	1
Medio	Severidad Media	10-20	0,5
Bajo	Severidad Alta	20-40	0

Fuente: Elaboración propia.

### Resumen del sistema de Lógica Difusa para la Robustez

A continuación, se presenta Tabla 7-8 que resume las variables de entrada del sistema difuso anteriormente descritas, con el fin de calcular el parámetro de Robustez como variable de salida del sistema. Aquí se relaciona los universos de discurso, términos lingüísticos y funciones de membresía definidos. En la

**Figura 7-15** se muestra la configuración del sistema difuso para la Robustez, finalmente la Figura 7-16 corresponde a las gráficas de las funciones de membresía de los criterios de entrada y salida.

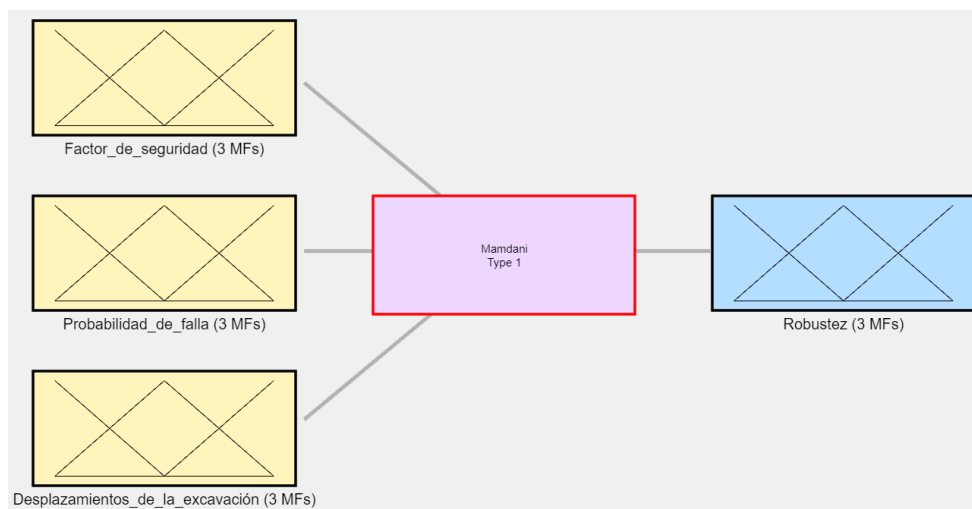
**Tabla 7-8:** Determinación del sistema difuso para el parámetro de robustez.

ENTRADA				SALIDA			
Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía	Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía
Factor de seguridad	0 - 2	Estable	trimf [1 2 3]	Robustez	0 - 1	Robusto	Sigm [0.5 1 1.5]
		Equilibrio Limite	trimf [0 1 2]			Robustez	trimf [0 0.5 1]

ENTRADA				SALIDA			
Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía	Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía
		Inestable	trimf [-1 0 1]			Media	
Probabilidad de falla	0 - 20	No falla	trimf [-10 0 10]			No Robusto	trimf [-0.5 0 0.5]
		Equilibrio	trimf [0 10 20]				
		Falla	trimf [10 20 30]				
Desplazamientos en la excavación	0 - 40 mm	Severidad Baja	trimf [-20 0 20]				
		Severidad Media	trimf [0 20 40]				
		Severidad Alta	trimf [20 40 60]				

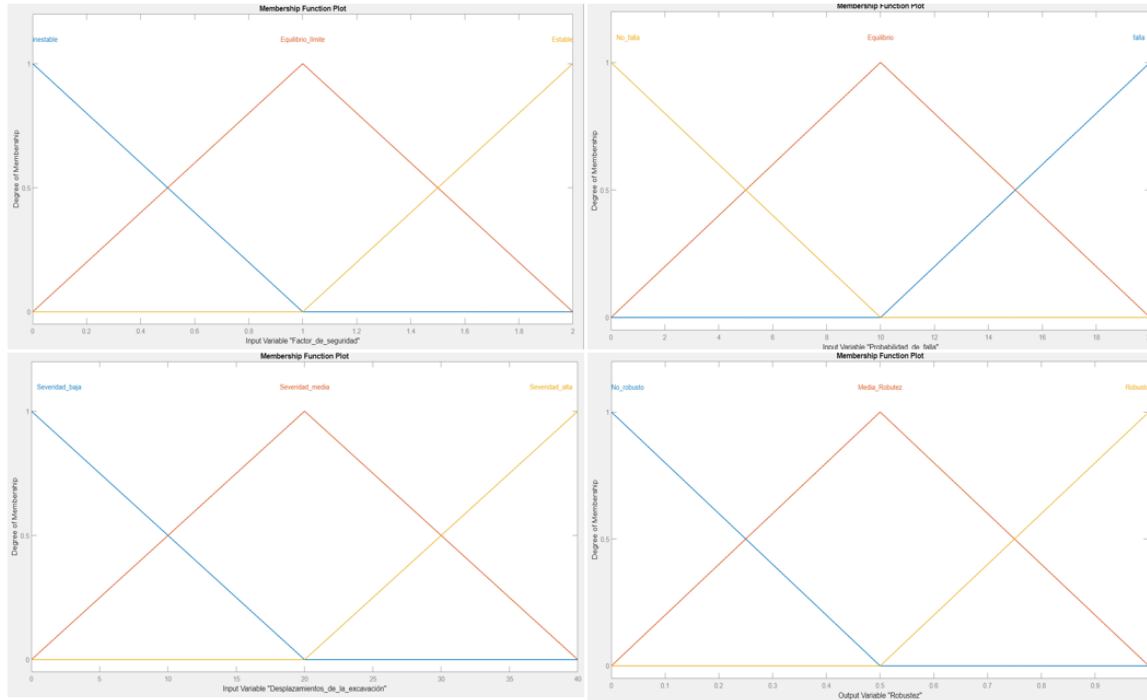
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7-15:** Configuración sistema difuso para la robustez en FuzzyLogic



Fuente: Elaboración propia, captura del Software Matlab.

**Figura 7-16:** Funciones de membresía de los criterios de entrada y la salida.



Fuente: Elaboración propia, captura del Software Matlab.

Después de establecer los términos lingüísticos con sus respectivas funciones de membresía, se debe decretar el sistema de reglas que permiten obtener el razonamiento difuso de la inferencia. Las reglas difusas entre los criterios factor de seguridad, probabilidad de falla y desplazamientos se presentan en la Tabla 7-9. Puede notarse que para la fusificación de las tres características que componen la robustez, es necesario realizar todas las combinaciones entre los términos lingüísticos de entrada y salida, y establecer el comportamiento que debe tomar en cada combinación.

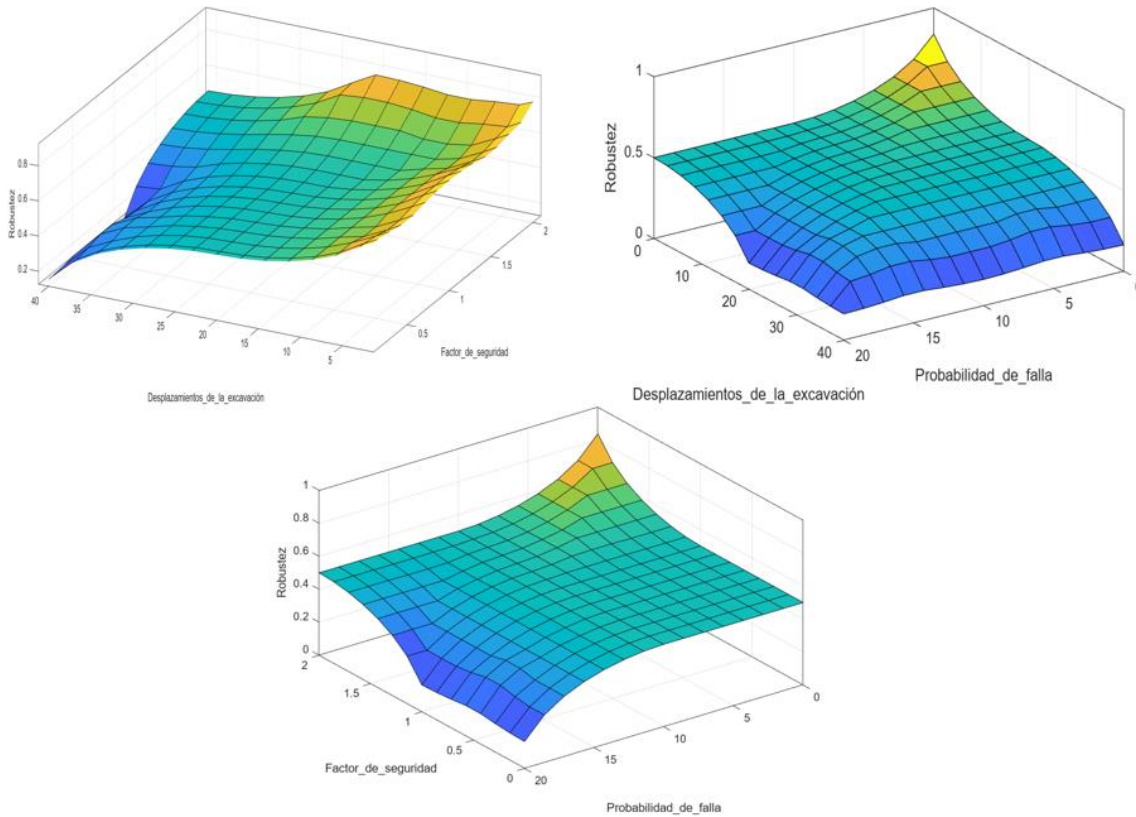
**Tabla 7-9:** Reglas para el parámetro de robustez.

Parámetro	SI (Entrada)			Entonces (Salida)
	Factor de seguridad	Probabilidad de falla	Desplazamientos en la excavación	Robustez
ROBUSTEZ	Estable	No falla	Severidad Baja	Robusto
			Severidad Media	Robusto
			Severidad Alta	Media Robustez
		Equilibrio	Severidad Baja	Robusto
			Severidad Media	Media Robustez
			Severidad Alta	Media Robustez
		Falla	Severidad Baja	Robusto
			Severidad Media	Media Robustez
			Severidad Alta	No Robusto
	Equilibrio límite	No falla	Severidad Baja	Robusto
			Severidad Media	Media Robustez
			Severidad Alta	No Robusto
		Equilibrio	Severidad Baja	Media Robustez
			Severidad Media	Media Robustez
			Severidad Alta	No Robusto
		Falla	Severidad Baja	Media Robustez
			Severidad Media	No Robusto
			Severidad Alta	No Robusto
	Inestable	No falla	Severidad Baja	Robusto
			Severidad Media	Media Robustez
			Severidad Alta	No Robusto
		Equilibrio	Severidad Baja	Media Robustez
			Severidad Media	Media Robustez
			Severidad Alta	No Robusto
		Falla	Severidad Baja	No Robusto
			Severidad Media	No Robusto
			Severidad Alta	No Robusto

Fuente: Elaboración propia.

De la base de reglas se obtiene las superficies de conocimiento, las cuales muestran las relaciones difusas entre conjuntos difusos factor de seguridad, probabilidad de falla y desplazamientos en la excavación. En la Figura 7-17 se presentan las superficies de conocimiento respectivas.

**Figura 7-17:** Relaciones difusas entre criterios de robustez.



Fuente: Elaboración propia, captura del Software Matlab.

Las superficies reflejan de manera efectiva el comportamiento que se quiere del sistema y que fue determinado en el numeral 6 para los criterios de robustez. Se puede ver que en la relación desplazamiento en la excavación y factor de seguridad la superficie de conocimiento disminuye al incrementar los desplazamientos y a su vez cuando el factor de seguridad es menor a 1; asimismo para la relación de los desplazamientos con la probabilidad de falla se evidencia que la superficie disminuye en robustez cuando los desplazamientos se acercan a 40 mm y cuando la probabilidad de falla aumenta.

## 7.2 Redundancia

La redundancia al considerarse como la capacidad que tiene un sistema para mantener su funcionalidad a pesar de las consecuencias de un evento, puede cuantificarse por el



---

número de componentes sustituibles o redundantes dentro de la red de sistema (Lee, 2016c). Por tanto, el análisis para determinar el parámetro de redundancia se tiene como eje principal todo el sistema analizado, es decir, la excavación y su entorno, evaluando las características de la infraestructura adyacente como lo son las vías, andenes, parques y las colindancias con edificaciones de la excavación, ya que, por ejemplo, la presencia de una falla de fondo hace que se trasladen las afectaciones al espacio público con la presencia de deformaciones excesivas que a su vez pueden generar la pérdida total de funcionalidad. En este caso se ha considerado revisar tres características del espacio circundante; para vías se revisará el nivel de servicio, para las redes de servicios que son vitales a nivel urbano se revisara la categoría de las redes colindantes, y finalmente se cuantificara las deformaciones del espacio público como andenes y parques y demás afectaciones a la infraestructura.

### **7.2.1 Niveles de servicio - vías**

Para las vías se considera como determinante de la funcionalidad los niveles de servicio, basado en las definiciones y parámetros descritos en el Manual de Capacidad y Nivel de Servicio en carreteras de dos carriles actualizado por el Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS), las cuales son presentadas en el Manual de Planeación y Diseño de Tránsito y Transporte aplicado en la ciudad de Bogotá. En este documento se encuentra la clasificación de las vías de acuerdo con la capacidad, definida en el manual como “el máximo número de vehículos que pueden circular por un punto o tramo uniforme de la vía en los dos sentidos durante cierto período de tiempo en las condiciones imperantes de vía y de tránsito” expresado en vehículos/hora; y el Nivel de Servicio, definido como la calidad del servicio que ofrece la vía a sus usuarios, que se refleja en el grado de satisfacción o contrariedad que experimentan al usar la vía.

En vías urbanas de circulación continua, es posible que ocurra congestión cuando la demanda de tránsito es inferior a la capacidad. Sin embargo, aunque se tenga una vía con capacidad suficiente para que no se genere la congestión, una vía denominada “tortuosa” por tener tránsito intenso, una calzada y/o carriles estrechos y el pavimento en mal estado no brindara la misma calidad de servicio que una vía con un trazado suave, calzada ancha y pavimento en buen estado. Por tanto, los expertos del Transportation Research Board, 2000, establecieron el concepto de nivel de servicio, como la Medida cualitativa que

describe las condiciones de circulación de una corriente vehicular, caracterizada generalmente por ciertos parámetros como velocidad y tiempo de recorrido, libertad para maniobrar, interrupciones de la circulación, comodidad y seguridad: (Tránsito et al., n.d.). El nivel de servicio en si es considerada una medida cualitativa, definida por parámetros numéricos, como la velocidad media o la densidad, y a veces por más de un parámetro. En el nivel de servicio influye la intensidad de la interacción vehicular, las condiciones de la vía y su entorno, y la calidad de la regulación y señalización vial entre otros.

En el HCM de 1965 se establecen seis niveles de servicio para los distintos tipos de vías: A, B, C, D, E y F. En vías de circulación continua el nivel de servicio A se establece por un régimen de flujo libre, cuando la interacción vehicular no afecta significativamente la velocidad de los vehículos; el nivel F representa condiciones de flujo forzado. Esta situación se produce cuando la cantidad de tránsito que se acerca a un punto excede la cantidad que puede pasar por él. En estos lugares se forman colas, y la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque, extremadamente inestables. B, C, D y E son niveles intermedios ubicados en los regímenes de flujo libre o flujo restringido. En vías de circulación discontinua no hay una correspondencia tan exacta entre los niveles de servicio y los regímenes de circulación, pues los vínculos entre la capacidad y el nivel de servicio no son tan estrechos. Ambos tipos de vía se suelen diseñar para los niveles de servicio C o D.

El nivel de servicio se define por el valor de uno o más parámetros, que varían de acuerdo con el tipo de vía. La Tabla 2.1 muestra los distintos parámetros que usa la versión del HCM de 2000 para determinar los niveles de servicio.

**Figura 7-18:** Velocidad en km/h de los niveles de servicio por tipo de terreno.

Tipo de terreno (Pendiente longitudinal)	Niveles de servicio					
	A	B	C	D	E	F
Plano < 3%	>83	72-83	62-72	52-62	42-52	≤42
Ondulado ≥ 3 - 6%	>68	59-68	51-59	43-51	34-43	≤34
Montañoso ≥ 6 - 8%	>52	45-52	39-45	33-39	26-33	≤26
Escarpado ≥ 8%	>36	31-36	27-31	23-27	18-23	≤18

Fuente: Tomado de (Tránsito et al., n.d.)

**Figura 7-19:** Criterios para niveles de servicio en vías multicarril.

Velocidad a flujo libre	Criterio	Nivel de servicio				
		A	B	C	D	E
100 km/h	Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	25
	Velocidad media (km/h)	100	100	98.4	91.5	88
	Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.32	0.50	0.72	0.92	1
	Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	700	1100	1575	2015	2200
90 km/h	Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	19	22	26
	Velocidad media (km/h)	90	90	89.8	84.7	80.8
	Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.30	0.47	0.68	0.89	1
	Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	630	990	1435	1860	2100
80 km/h	Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	27
	Velocidad media (km/h)	80	80	80	77.6	74.1
	Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.28	0.44	0.64	0.85	1
	Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	560	880	1280	1705	2000
70 km/h	Densidad máxima (Veh/km/carril)	7	11	16	22	28
	Velocidad media (km/h)	70	70	70	69.6	67.9
	Máxima relación volumen / capacidad (Veh/h/carril)	0.26	0.41	0.59	0.81	1
	Máxima tasa de flujo (Veh/h/carril)	490	770	1120	1530	1900

Fuente: Tomado de (Tránsito et al., n.d.)

A continuación, se presentan los niveles descritos en el Manual de Capacidad de niveles de Servicio carreteras de dos carriles y la comparación con lo descrito en el Manual de Planeación y Diseño de Tránsito y Transporte que es usado en la ciudad de Bogotá.

**Tabla 7-10:** Comparativa de Niveles de servicio de las vías.

Nivel De Servicio	Manual de Capacidad de niveles de Servicio carreteras de dos carriles	Manual de Planeación y Diseño de Tránsito y Transporte
A	<p>Representa flujo libre en una vía cuyas especificaciones geométricas son adecuadas.</p> <p>Hay libertad para conducir con la velocidad deseada y la facilidad de maniobrar dentro de la corriente vehicular es sumamente alta, al no existir prácticamente interferencia con otros vehículos y contar con condiciones de vía que no ofrecen restricción por estar de acuerdo con la topografía de la zona.</p>	<p>La circulación de los vehículos queda virtualmente libre de los efectos de la presencia de otros vehículos, y las operaciones únicamente quedan restringidas por la geometría de la carretera y por las preferencias del conductor. La maniobrabilidad dentro de la corriente circulatoria es buena. En este nivel se absorberán con facilidad las pequeñas alteraciones del flujo sin ningún cambio en la velocidad de recorrido</p>
B	<p>Comienzan a aparecer restricciones al flujo libre o las especificaciones geométricas reducen algo la velocidad. La libertad para conducir con la velocidad deseada y la facilidad de maniobrar dentro de la corriente vehicular se ven disminuidas, al ocurrir ligeras interferencias con otros vehículos o existir condiciones de vía que ofrecen pocas restricciones.</p> <p>Para mantener esta velocidad es preciso adelantar con alguna frecuencia otros vehículos. El nivel general de libertad y comodidad que tiene el conductor es bueno.</p>	<p>Es también indicativo de flujo libre, aunque empieza a ser perceptible la presencia de otros vehículos. Las velocidades medias de recorrido son las mismas que en el Nivel de Servicio "A", pero los conductores tienen una libertad de maniobra ligeramente inferior. En este nivel las alteraciones pequeñas todavía se absorben fácilmente, aunque se hacen más patentes ciertos deterioros locales.</p>
C	<p>Representa condiciones medias cuando el flujo es estable o empiezan a presentarse restricciones de geometría y pendiente. La libertad para conducir con la velocidad deseada dentro de la corriente vehicular se ve afectada al presentarse interferencias tolerables con otros vehículos, deficiencias de la vía que son en general aceptables. El nivel general de libertad y comodidad que tiene el conductor es adecuado.</p>	<p>Representa un rango en el cual queda marcada la influencia de la densidad del tráfico sobre las operaciones. Ahora la presencia de otros vehículos claramente afecta la maniobrabilidad de la corriente circulatoria. Las velocidades medias de recorrido comienzan a mostrar alguna reducción en aquellas carreteras multicarril con velocidades libres por encima de 80 km/h. Es de esperar que las pequeñas alteraciones en el flujo provoquen serios deterioros localizados del servicio, y que se formen colas detrás de cualquier alteración del tráfico.</p>
D	<p>El flujo todavía es estable y se presentan restricciones de geometría y pendiente. No existe libertad para</p>	<p>Representa un rango en el cual la capacidad de maniobra se ve seriamente restringida debido a la</p>

Nivel De Servicio	Manual de Capacidad de niveles de Servicio carreteras de dos carriles	Manual de Planeación y Diseño de Tránsito y Transporte
	conducir con la velocidad deseada dentro de la corriente vehicular, al ocurrir interferencias frecuentes con otros vehículos, o existir condiciones de vía más defectuosas. El nivel general de libertad y comodidad que tiene el conductor es deficiente.	congestión de la circulación. Al incrementarse los volúmenes la velocidad de recorrido comienza a reducirse. Solo es posible absorber las alteraciones pequeñas sin que se formen largas colas y sin que el nivel de Servicio disminuya.
E	<p>Representa la circulación a Capacidad cuando las velocidades son bajas, pero el tránsito fluye sin interrupciones. En estas condiciones es prácticamente imposible adelantar, por lo que los niveles de libertad y comodidad son muy bajos.</p> <p>La circulación a Capacidad es muy inestable, ya que pequeñas perturbaciones al tránsito causan congestión.</p> <p>Aunque se han tomado estas condiciones para definir el nivel E, este nivel también se puede alcanzar cuando limitaciones de la vía obligan a ir a velocidades similares a la velocidad a Capacidad, en condiciones de inseguridad.</p>	<p>Representa una explotación en, o cerca de, la capacidad, y es bastante inestable. Las densidades varían en función de la velocidad libre. En el NS E los vehículos ruedan con el mínimo espaciamiento para el que se puede mantener un flujo uniforme.</p> <p>Al aproximarse al límite inferior del Nivel de Servicio no pueden absorberse o disiparse rápidamente la mayoría de las alteraciones, y estas ocasionan la formación de colas y la caída al NS F. En la mayoría de las carreteras multicarril con velocidades libres entre 70 y 100 km/h, la velocidad de los vehículos ligeros oscila entre 68 y 88 km/h, pero son muy variables e impredecibles.</p>
F	Representa la circulación congestionada, cuando el volumen de demanda es superior a la Capacidad de la vía y se rompe la continuidad del flujo. Cuando eso sucede, las velocidades son inferiores a la velocidad a Capacidad y el flujo es muy irregular. Se suelen formar largas colas y las operaciones dentro de estas se caracterizan por constantes paradas y avances cortos. También condiciones sumamente adversas de la vía pueden hacer que se alcancen velocidades e irregularidades en el movimiento de los vehículos semejantes a las descritas anteriormente.	Representa un flujo forzado o en colapso. Esto se produce bien en un punto al que los vehículos llegan a una tasa mayor que la tasa de descarga o en un punto de una carretera en planeamiento donde la demanda prevista excede la capacidad calculada. Aunque la operación en estos puntos (y en los tramos inmediatamente corriente abajo) parecen estar a capacidad, se formarán colas detrás de estos puntos. La circulación en las colas es altamente inestable, presentándose breves períodos de movimiento seguidos por paradas.

Fuente: elaborado a partir de (Tránsito et al., n.d.).

Como se puede ver en la anterior tabla, las descripciones de los seis niveles de servicio son características cualitativas, que si bien, pueden ser consideradas por algunos parámetros numéricos, como la velocidad media o la densidad, la influencia puede estar

dada también por la intensidad de la interacción vehicular, las condiciones de la vía y su entorno, y la calidad de la regulación y señalización vial entre otros, por tanto, priman las descripciones cualitativas.

En la aplicación de este trabajo se usarán las características cualitativas del nivel de servicio descritas en el Manual de Capacidad y Nivel de Servicio en carreteras de dos carriles (columna 2, de la tabla 6-2) ya que son un resumen del significado de cada uno de los niveles de manera clara y sencilla para el alcance del presente proyecto.

### Parámetros de lógica difusa para Nivel de servicio en vías

Se ha definido una relación directa entre el nivel de servicio de la vía, el cual se encuentra en categorías de A hasta F, y la Redundancia del sistema, teniendo que, a medida que la vía cambia sus características funcionales a causa de las deformaciones o demás afectaciones, el nivel de servicio de la vía baja y así mismo la Redundancia.

Con el objetivo de simplificar la inferencia difusa y no generar una sobre dimensionalidad del sistema, se han agrupado los niveles de servicio descritos en la

**Tabla 7-10** en dos, ya que no se identifica un cambio significativo que pueda alterar el razonamiento aplicado. La relación entre los conjuntos difusos se establece así:

**Tabla 7-11:** Relación conjuntos difusos de redundancia y nivel de servicio

Nivel de Redundancia	Nivel de Servicio Vías Alternas	Valor en la cuantificación	Calificación
Alta	A – B	1	Asignar un valor entre 0 y 1 si los niveles de servicio de las vías perimetrales están en niveles intermedios de los establecidos en la
Media	C – D	0,5	
Baja	E - F	0	

**Tabla 7-10**

---

Fuente: Elaboración propia.

### **7.2.2 Redes de servicios**

En los entornos urbanos las redes de servicios son principalmente subterráneas y se encuentran colindando con las edificaciones, principalmente bajo los andenes peatonales y en algunas ocasiones bajo las vías. En Bogotá las redes de servicios públicos que se encuentran subterráneas son, acueducto, alcantarillado, gas natural, y telecomunicaciones; el servicio de energía en su mayoría se compone de una red aérea.

Para los servicios de acueducto y Alcantarillado, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) tiene construidas redes matrices, redes menores de acueducto, redes troncales y redes menores de alcantarillado combinado.

Según el Artículo 214 del Decreto 619 de 2000, la estructura del sistema de Gas Natural domiciliario está conformado por las fuentes naturales que proporcionan el gas, los gasoductos que lo transportan a la ciudad, las estaciones urbanas de recibo y las redes matrices y secundarias para la distribución en todo el territorio urbano y de expansión.

En el Artículo 224 "*Estructura del Sistema de telecomunicaciones (artículo 212 del Decreto 619 de 2000)*" el servicio de telecomunicaciones consiste en el conjunto de sistemas, redes y equipos que aseguran la comunicación y transmisión de señales (voz, imágenes, datos) con el fin de establecer una comunicación entre dos personas o dos equipos, localizados a distancia. Está integrado por la fuente de generación, los sistemas de distribución y redes asociadas que conducen la señal hasta el usuario final y la infraestructura necesaria para cumplir con las condiciones técnicas de su suministro en todo el territorio urbano y de expansión.

Por su parte, el sistema de Energía Eléctrica según el Artículo 217 "*Estructura del Sistema de Energía (artículo 205 del Decreto 619 de 2000)*" está integrado por las fuentes de generación, los sistemas de transmisión que la conducen a la ciudad, los sistemas de transformación y distribución de esta. las redes asociadas que las transportan hasta el usuario final y la infraestructura necesaria para cumplir con las condiciones técnicas de

suministro en todo el territorio urbano y de expansión. El Servicio de Alumbrado público es sistema de iluminación de vías públicas y demás espacios de libre circulación que no se encuentran a cargo de ninguna persona natural o jurídica de derecho privado o público diferente al Distrito Capital, con el objetivo de proporcionar la visibilidad para el normal desarrollo de las actividades vehiculares como peatonales. El sistema de semaforización hace parte de la estructura del alumbrado público de la ciudad. Su administración y operación está a cargo de la Secretaría de Tránsito y Transporte (STT). Artículo 220 “Estructura del Servicio de Alumbrado público (artículo 208 del Decreto 619 de 2000”, modificado por el artículo 165 del Decreto 469 de 2003).

De acuerdo con el marco DPSIR se debe evaluar las afectaciones que pueden tener en las redes de servicios bajo una posible falla de la excavación, teniendo en cuenta el orden de prioridad de las redes en el sector donde se localiza la excavación. Es claro que las categorías establecidas para los servicios domiciliarios suponen un nivel de impacto diferente y proporcional, es decir, a medida que sube la importancia de la red si son primarias secundarias o terciarias, es la afectación a los usuarios que podrían verse afectados por la fallas o suspensión en el suministro.

Por lo tanto, en este trabajo se propone evaluar la existencia de redes subterráneas en zonas aledañas a la excavación e identificar la categoría de acuerdo con lo establecido por cada entidad prestadora. Para zonas urbanas esta información se encuentra en base de datos abiertas al público.

**Tabla 7-12:** Descripción de la categoría de las redes de servicios públicos.

Categoría de la Red	Descripción
Terciaria	Abastecen a un sector pequeño de la población y los daños pueden ser intervenidos de manera rápida.
Secundaria	Abastecen a un sector mediano de la población y se conectan a redes terciarias. Los daños pueden ser intervenidos de manera rápida dependiendo de las demás conexiones de la red.
Primaria	Abastecen varias de las redes secundarias y a gran parte de la población. Los daños pueden causar grandes



	afectaciones a los usuarios y pueden tomar mayor tiempo de intervención.
--	--

Fuente: Elaboración propia

### Parámetros de lógica difusa para Redes de servicios

La relación entre la importancia de las redes de servicios públicos y su influencia en el parámetro de Redundancia se explicó en el numeral 7.2.2, en consecuencia, la relación establecida para la inferencia difusa es, entre mayor sea la categoría de las redes de servicios mayor es el impacto en la funcionalidad del sistema en caso de falla, por tanto, entre mayor sea la categoría de las redes en el área circundante, menor es la Redundancia del sistema. Basados en lo anterior, para la variable lingüística “Redes de servicios” en el control difuso se han establecido tres términos lingüísticos que corresponden a las categorías de la red de servicios que son Primaria, Secundaria y Terciaria

A continuación, se presenta la relación establecida en este trabajo para los conjuntos difusos de la categoría de las redes de servicios respecto a la redundancia del sistema bajo la premisa que, si existe una falla o afectación de dichas redes, esta afectara la redundancia en proporción a la categoría. Para su cuantificación se dará valores acordes al Universo de discurso entre 0 y 1.

**Tabla 7-13:** Relación entre Redundancia y categoría de las redes.

Nivel de Redundancia	Categoría de la Red	Valor en la cuantificación
Alta	Terciaria	1
Media	Secundaria	0,5
Baja	Primaria	0

Fuente: Ajustado de (Pedreros & Roncancio, 2022b)

### 7.2.3 Deformaciones en el entorno

Como se mencionó anteriormente, el sistema de la excavación está compuesto en igual medida de la infraestructura alrededor de esta, por tanto, se debe tener en cuenta las deformaciones y daños ocasionados en el espacio público como vías, andenes, parques y

edificaciones en las colindancias, en caso de haberlas, a causa de asentamientos del terreno natural. Estas deformaciones serán medidas y cuantificadas del mismo modelo de elementos finitos presentado en el numeral 7.1.3, por tanto, el modelo debe implementar todos los elementos de la infraestructura circundante, teniendo en cuenta, cargas de servicio, para el caso de vías, como las cargas de edificaciones vecinas.

De acuerdo con la NSR-10, las deformaciones admisibles *“deben ser suficientemente pequeñas para que no causen daños a las construcciones e instalaciones adyacentes ni a los servicios públicos”*. En este caso se ha establecido que las máximas deformaciones para evitar la interrupción en la funcionalidad de la infraestructura adyacente deben ser de 40 mm en superficie, las deformaciones superiores a 40 mm dan lugar a una pérdida gradual de la funcionalidad de la zona adyacente afectando redes de servicios que se encuentran subterráneos, por lo tanto, bajo el marco de DPSIR la redundancia es menor entre mayor sean las deformaciones.

Respecto a las deformaciones en el entorno, que pueden ser inferidas por asentamientos del terreno natural, deben ser evaluadas no solo para determinar los procesos derivados de la ejecución de la excavación, también para determinar el grado de afectación de las colindancias, que hacen parte de la redundancia del sistema. El universo de discurso y las funciones de membresía son del mismo orden que las deformaciones en la robustez, teniendo en cuenta que los desplazamientos en la excavación se pueden trasladar en deformaciones externas, pudiendo comprobar la conexión con el entorno.

**Tabla 7-14:** Relación entre robustez y los desplazamientos en el entorno.

Nivel de Robustez	Grado de Severidad	Valores de referencia (mm)	Valor en la cuantificación
Alto	Severidad Baja	0-10	1
Medio	Severidad Media	10-20	0,5
Bajo	Severidad Alta	20-40	0

Fuente: Elaboración propia

### Resumen del sistema de lógica difusa para la robustez

Las variables lingüísticas de salida es la robustez se presentan a continuación junto con los términos lingüísticos para cada uno y su respectiva función de membresía.

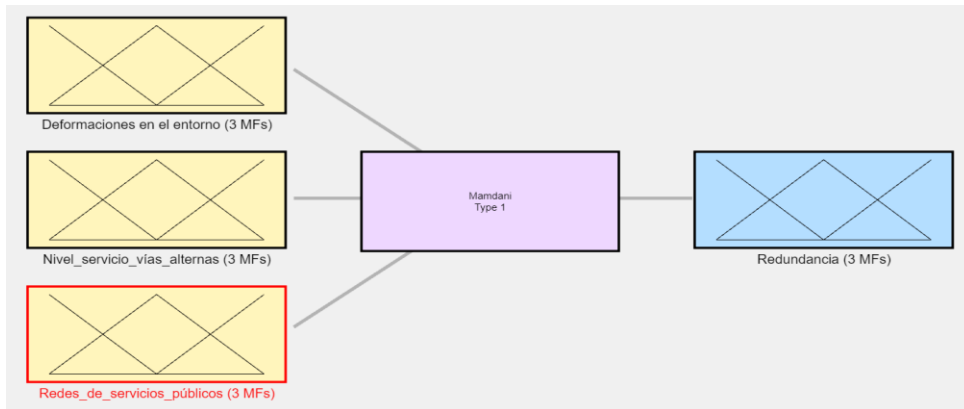
**Tabla 7-15:** Determinación del sistema difuso para el parámetro de Redundancia.

Parámetro de resiliencia	Entrada				Salida			
	Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía	Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía
Redundancia	Daños al espacio público por subsidencia: Deformaciones en Andenes, vías y parques	0-40 mm	Severidad Baja	trimf [-20 0 20]	Redundancia	0 - 1	Redundante	trimf [0.5 1 1.5]
			Severidad Media	trimf [0 20 40]				
			Severidad Alta	trimf [20 40 60]				
	Nivel de servicio de las vías alternas	0 - 1	A y B	trimf [0.5 1 1.5]			Medianamente Redundante	trimf [0 0.5 1]
			C y D	trimf [0 0.5 1]				
			E y F	trimf [-0.5 0 0.5]				
	Redes de servicios públicos	0-1	Primarias	trimf [-0.5 0 0.5]			No Redundante	trimf [-0.5 0 0.5]
			Secundarias	trimf [0 0.5 1]				
			Terciarias	trimf [0.5 1 1.5]				

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7-20 se muestra la configuración del sistema difuso para la Redundancia, finalmente la Figura 7-21 corresponde a las gráficas de las funciones de membresía de los criterios de entrada y salida.

**Figura 7-20:** Configuración sistema difuso para la Redundancia



Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

**Figura 7-21:** Funciones de membresía de cada criterio y salida.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

Al igual que se presentó para el parámetro de robustez, para cada parámetro de resiliencia se debe decretar el sistema de reglas que permiten obtener el razonamiento difuso de la inferencia. Las reglas difusas para la inferencia del parámetro de redundancia se presentan

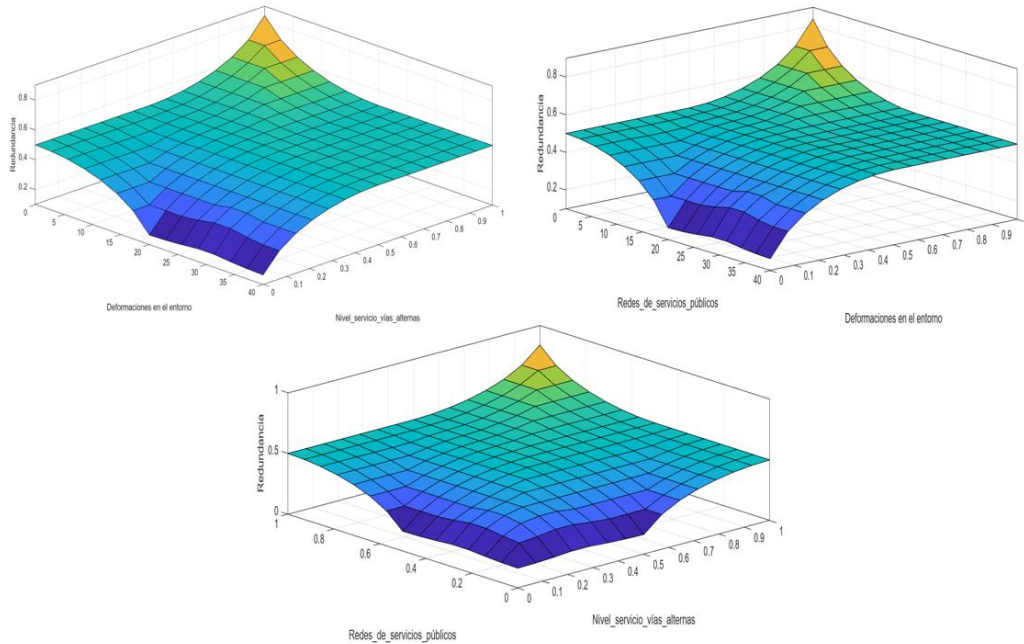
en la Tabla 7-16, y en la Figura 7-22 se presentan las superficies de conocimiento de las reglas SI\_Entonces.

**Tabla 7-16:** Reglas para el parámetro de Redundancia.

Parámetro	SI (Entrada)			Entonces (Salida)
REDUNDANCIA	Deformaciones en el entorno	Nivel de servicio de las vías alternas	Redes de servicios públicos	Redundancia
	Severidad Baja	A y B	Terciarias	Redundante
			Secundarias	Redundante
			Primarias	Medianamente Redundante
		C y D	Terciarias	Redundante
			Secundarias	Medianamente Redundante
			Primarias	Medianamente Redundante
		E y F	Terciarias	Redundante
			Secundarias	Medianamente Redundante
			Primarias	No Redundante
	Severidad Media	A y B	Terciarias	Redundante
			Secundarias	Medianamente Redundante
			Primarias	Medianamente Redundante
		C y D	Terciarias	Medianamente Redundante
			Secundarias	Medianamente Redundante
			Primarias	No Redundante
		E y F	Terciarias	Medianamente Redundante
			Secundarias	No Redundante
			Primarias	No Redundante
	Severidad Alta	A y B	Terciarias	Medianamente Redundante
			Secundarias	Medianamente Redundante
			Primarias	No Redundante
		C y D	Terciarias	Medianamente Redundante
			Secundarias	Medianamente Redundante
Primarias			No Redundante	
E y F		Terciarias	Medianamente Redundante	
		Secundarias	No Redundante	
		Primarias	No Redundante	

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7-22:** Relaciones difusas entre parámetros de redundancia.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

Las superficies representan el comportamiento que se estableció en el numeral 7.2 con las variables lingüísticas de entrada y salida para el cálculo de redundancia.

### 7.3 Capacidad de Gestión

La capacidad de gestión está definida como la rapidez que puede tener el sistema para afrontar un evento y compone de tres herramientas, preparación, manejo y respuesta durante el suceso en la recuperación de la funcionalidad. Se considera en este caso que la capacidad de gestión debe evaluarse tanto al interior del proyecto como los demás elementos externos que posibilitan las adecuadas acciones de respuesta frente a un evento disruptivo.

Para el sistema de excavación y su entorno se ha considerado la evaluación del comportamiento del suelo por medio del monitoreo geotécnico como un elemento de gestión interno planeado desde el diseño y que debe ser implementado antes del inicio de

las actividades y continuado en la construcción; el monitoreo geotécnico es considerado un paso clave en las soluciones de ingeniería geotécnica sostenible (Basu et al., 2015) . Como elemento externo se consideran las políticas de riesgo a nivel gubernamental, en este caso por ser una ciudad capital, se hace un repaso del PLAN DISTRITAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES Y DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA BOGOTÁ D.C., 2018-2030 y los mecanismos para la atención de emergencias. Adicionalmente, para evaluar la Capacidad de gestión, se ha considerado una variable de tipo económico, como es la caracterización socioeconómica del área de influencia del proyecto en cuestión, con el fin de establecer un nivel de afectación por el evento disruptivo al área de influencia del sistema, permitiendo también un acercamiento a la evaluación de daños y de recuperación.

Estos criterios son en mayoría cualitativos, que, si bien se ajustan a la definición de capacidad de gestión para la resiliencia, hacen que el análisis cuantitativo requerido en las modelaciones en el ámbito de la ingeniería sea difícil de interpretar, sin embargo, con la aplicación de la lógica difusa para cada uno de los criterios se logra realizar el cálculo del parámetro y reducirlo a un valor determinado. Al final del numeral se presentan las relaciones establecidas entre los criterios adoptados para el cálculo del nivel de capacidad de gestión de la excavación.

### **7.3.1 Control y monitoreo geotécnico**

Las excavaciones puede ser la intervención más importante en el ámbito de la geotecnia, ya que presenta complicaciones mayores a las que puede presentar una cimentación p.e. debido al desconfinamiento generado en la masa de suelo. En las excavaciones es importante monitorear los elementos que la conforman; este control puede ser realizado con inspecciones que corresponden a labores de observación y auscultación con el fin de recolectar información que permita identificar, evaluar y predecir el comportamiento de los materiales térreos desde el punto de vista de estabilidad, además, verificar la eficacia de las obras construidas; a partir de dicha información deberán planear, reformular y verificar acciones tendientes a mitigar impactos negativos, en caso de que se presenten (John Dunicliff, 1998).

Adicional a las inspecciones, el monitoreo se debe complementar con un plan periódico con control topográfico, instalación de instrumentos y monitoreo de estos, partiendo de

medidas tomadas antes de la obra y registradas en actas de vecindad en donde se registren los estados de las edificaciones adyacentes antes de la construcción, esto con el propósito de validar si cualquier daño que ocurra es atribuible a la construcción de la obra.

Dichas labores se deben realizar desde el inicio de la etapa de construcción, mediante el registro de inspecciones visuales realizadas con una frecuencia mínima semanal; sin embargo, es importante que dichas inspecciones se hagan luego de la ocurrencia de eventos sísmicos y de lluvias catalogadas como torrenciales. En la etapa de operación, las inspecciones se pueden efectuar cada 2 meses (John Dunicliff, 1998).

En general, se recomienda que, en las actividades de construcción de las pantallas y excavaciones, se cuente con la supervisión e inspección de un Ingeniero Geotecnista con el fin de que verifique las condiciones de estabilidad de estas. El sistema de monitoreo debe ser implementado en cada etapa de construcción, a saber: previo a la preparación a la construcción de las pantallas y demás elementos, durante la construcción, durante el proceso de excavación, al finalizar las obras y en las etapas posteriores de operación.

A continuación, se presenta el resumen de lo anteriormente expuesto a manera de ejemplo

**Tabla 7-17:** Plan de control de monitoreo típico para una excavación.

ACTIVIDAD	MEDIDAS A TOMAR	INTRUMENTOS	INICIO DE LECTURAS	FRECUENCIA	
				DURANTE CONTRUCCIÓN	ETAPA DE OPERACIÓN
Control Topográfico	Desplazamientos horizontales y verticales	Estación total Nivel de precisión	Etapa de pre construcción (mínimo 2 semanas antes del inicio de la construcción)	2 veces por semana	Semanal
Instrumentación Geotécnica	Presión de poros	Piezómetros	Etapa de pre construcción (mínimo 2 semanas antes del inicio de la construcción)	2 veces por semana	Semanal
	Deformaciones horizontales	Inclinómetros	Etapa de pre construcción (mínimo 2 semanas antes del inicio de la construcción)	2 veces por semana	Semanal



ACTIVIDAD	MEDIDAS A TOMAR	INTRUMENTOS	INICIO DE LECTURAS	FRECUENCIA	
				DURANTE CONTRUCCIÓN	ETAPA DE OPERACIÓN
	Deformaciones y esfuerzos	Medidores de deformación unitaria	Una vez finalizada la construcción de las pantallas y puntales	2 veces por semana	Semanal

Fuente: Elaboración propia

Por lo descrito anteriormente, se considera que para evaluar la capacidad de gestión que puede llegar a tener el sistema de excavación en un entorno urbano es importante determinar la existencia e implementación de un plan de control y monitoreo geotécnico ya que puede influir directamente en la evaluación continua que se hace de la obra y por tanto la identificación de planes de acción destinados a evitar y/o mitigar los comportamientos no esperados del suelo y el sistema que conforman la excavación.

En la práctica de la ingeniería en Colombia, a pesar de las recomendaciones hechas en los diferentes códigos de diseño, en ocasiones el monitoreo geotécnico no es implementado de manera correcta o suficiente. A continuación, se presenta el comportamiento esperado del parámetro “Capacidad de gestión” debido a la implementación o falta de un plan de monitoreo geotécnico.

**Tabla 7-18:** Niveles de control y monitoreo en una excavación.

Nivel	Control Y Monitoreo Geotécnico
Alto	Se plantea en el diseño. Se implementa en construcción. Se lleva registro y control con sistema activo de alertas tempranas.
Medio	Se plantea en el diseño. Alguno de sus componentes se implementa en construcción. No se lleva registro del monitoreo.
Bajo o Nulo	No se plantea en el diseño O no se implementa en construcción

Fuente: Elaboración propia

### **Parámetros de lógica difusa para Control y Monitoreo Geotécnico**

En primera medida, para el monitoreo geotécnico se estableció una relación directa, es decir si el monitoreo es alto (de acuerdo con lo establecido en la Tabla 7-18) la Capacidad de Gestión es alta. Para el cálculo se tienen valoraciones entre 0 y 1 con valores extremos de 0, 0,5 y 1, para el nivel de Monitoreo Alto, Medio y Bajo respectivamente, sin embargo,

el monitoreo de la excavación puede variar sus características de las condiciones presentadas en la Tabla 7-18, entonces el evaluador podrá dar valores entre los rangos extremos, y así evaluar cuantitativamente esta característica de la excavación, esto es posible ya que la lógica difusa asigna un nivel de pertenencia a los conjuntos difusos Alto, Medio o Bajo para finalmente obtener el valor de Capacidad de Gestión correspondiente. A continuación, se presenta la relación mencionada.

**Tabla 7-19:** Relación de Redundancia con el nivel de monitoreo en la excavación.

Nivel	Redundancia	Valor en la cuantificación	Calificación
Alto	Alta	1	Asignar un valor entre 0 y 0,5 si las condiciones de monitoreo de la excavación están en niveles intermedios de los establecidos en la Tabla 7-18
Medio	Media	0,5	
Bajo o Nulo	Baja	0	

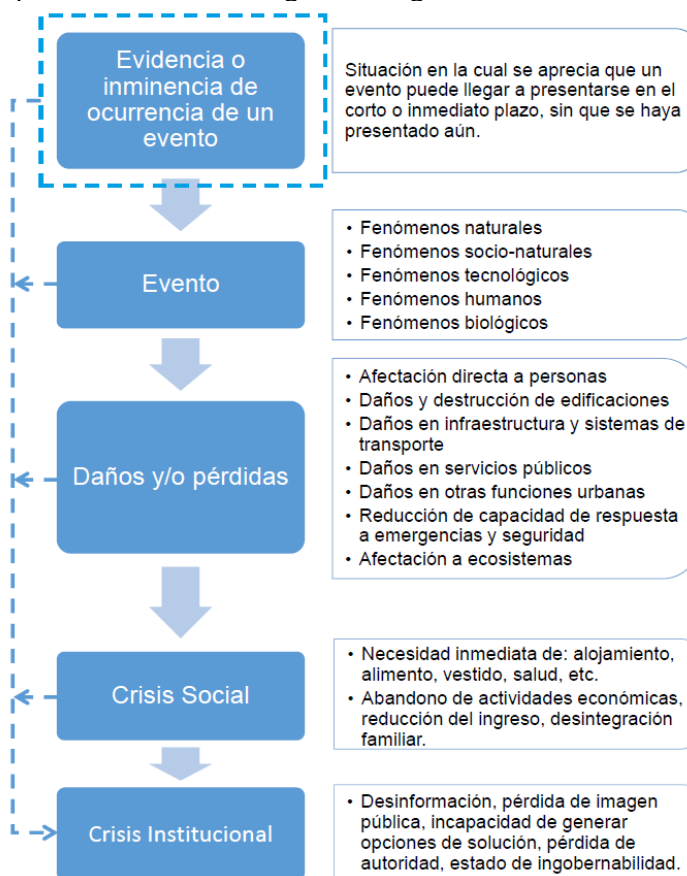
Fuente: Elaboración propia

### 7.3.2 Políticas de gestión frente al riesgo

Bogotá cuenta con el Sistema Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, el cual ha creado la Estrategia Distrital para la Respuesta a Emergencias que establece la base tanto para el planteamiento e implementación de acciones de preparación para la respuesta a emergencias. En este marco se presenta los lineamientos de actuación de los 16 servicios de respuesta a emergencias de acuerdo al alcance de las entidades gubernamentales y de orden distrital con la capacidad de afrontar situaciones de emergencia. En el documento se establece el procedimiento general de la respuesta para optimizar la atención el cual se basa en 7 funciones principales, la planeación y manejo de general de la respuesta, evaluación de daños, riesgos asociados y análisis de necesidades, información pública, logística, telecomunicaciones para la respuesta y aspectos financieros y jurídicos

Para establecer un correcto marco de actuación frente al manejo de emergencias se debe identificar los diferentes componentes de la emergencia, el Sistema Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (SDGR-CC) propone:

**Figura 7-23:** Componentes de la emergencia según SDGR-CC.



Fuente: Marco Actuación IDIGER (AEVAL, 2016)

En el documento se identifican 16 unidades de respuesta, de acuerdo con el tipo de evento que se presente, ya sea calificado como evento, daño o crisis social. Estos son: Accesibilidad y transporte, salud, búsqueda y rescate, extinción de incendios, manejo de materiales peligrosos, evacuación asistida, ayuda humanitaria, alojamientos temporales, agua potable, energía y gas, telecomunicaciones para la comunidad, restablecimiento de contactos familiares, saneamiento básico, manejo de escombros y obras de emergencia, manejo de cadáveres y seguridad y convivencia.

El marco de actuación define las entidades ejecutoras para cada uno de los servicios de ayuda en la ciudad. Adicionalmente, establece el procedimiento articulado para la respuesta y la estructura de coordinación en cuatro niveles: red de telecomunicaciones para emergencias, Puesto de Mando Unificado–PMU en terreno, Centro de Operaciones de Emergencia–COE y Consejo Distrital de Gestión de Riesgos. Todos ellos con el objetivo de proteger la vida, evitar mayores daños y pérdidas a nivel social, económico y patrimonial, mantener y facilitar la continuidad de las actividades normales del distrito, garantizar la restitución de los servicios en el momento de ser afectados.

Fuente: Marco Actuación IDIGER (AEVAL, 2016)

Los ejecutores de los servicios de respuesta son principalmente entidades distritales, como la secretaria de Salud, Movilidad Habitad, medio ambiente, desarrollo urbano, Alcaldías Locales, Cuerpo Oficial de Bomberos, Institutos como el de protección social, Gestión del Riesgo y Cambio Climático, entre otros. También pueden ser entidades a nivel Regional y Nacional que pueden ejecutar servicios de respuesta a emergencias a nivel distrita así como entidades y organizaciones privadas, con el fin de atender la emergencia con rapidez en caso de que el evento exceda las capacidades de orden Distrital.

El marco de actuación establece también la estructura organizacional para la coordinación de emergencias donde se presenta como primera unidad coordinadora la Red Distrital de Comunicaciones de Emergencias que mantiene una comunicación permanente con las entidades prestadoras de servicios de emergencias con el fin de articular los recursos de acuerdo a cada caso de emergencia, como segunda instancia se crea el Puesto de Mando Unificado (PMU), el cual se activa para la coordinación en el momento de atender la emergencia cuando se activan más de dos entidades respondientes. En tercer lugar se encuentra la coordinación del Centro de Operaciones de Emergencias (COE) el cual se genera cuando la situación de emergencia es intensa y se extiende en daños. Por último y ante un evento de gran magnitud en la ciudad de Bogotá, se establece el Consejo Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (CDGR-CC) el cual se conforma a solicitud del Alcalde Mayor o su Secretario General.

Con el fin de generalizar este criterio, en la Tabla 7-20 se establecen los niveles en Políticas de gestión con los que puede contar una excavación en entornos urbanos, de acuerdo con el marco de actuación de las entidades distritales para la atención de emergencias.

**Tabla 7-20:** Niveles en Políticas de gestión de una excavación.

Políticas de gestión	Escenarios de Repuesta
Alta	Existen entidades para la atención de emergencias y están articuladas
Media	Existen entidades para la atención de emergencias, pero no están articuladas
Baja	No existen entidades para la atención de emergencias

Fuente: Elaboración propia

### Parámetros de lógica difusa para políticas de gestión

Este criterio se ha definido de manera similar al de control y monitoreo, estableciendo una relación directa entre el nivel de Políticas de políticas de gestión con el parámetro resiliente de Capacidad de Gestión, asignando valore de calificación entre 0 y 1. Para este criterio es importante que el evaluador tenga información de las políticas de gestión tanto al interior del proyecto como a nivel local y con ellos pueda hacer una evaluación y análisis detallado de este criterio. En la Tabla 7-21 se resume la relación recomendada.

**Tabla 7-21:** Relación de Capacidad de gestión con las Políticas de gestión.

Nivel de Políticas de gestión	Capacidad de gestión	Valor en la cuantificación	Calificación
Alta	Alta	1	Asignar un valor entre 0 y 1 si las condiciones de la política de gestión ante emergencias en el área de la excavación están en niveles intermedios de los establecidos en la Tabla 7-20
Media	Media	0,5	
Baja o Nulo	Baja	0	

Fuente: Elaboración propia

### 7.3.3 Caracterización socio económica del área

Parte de la capacidad de gestión, consiste en el reconocimiento y evaluación de las características socioeconómicas de los elementos que componen el sistema, hacer una estimación de los costos permite reconocer las medidas necesarias a implementar para la recuperación en caso de evento, así como la evaluación en la toma de decisiones para implementar medidas de reparación o reconstrucción. En este estudio el reconocimiento y evaluación de los daños se revisa a nivel cuantitativo de robustez y redundancia, sin embargo, es necesario conocer las características socioeconómicas en el área de influencia de la excavación, ya que estas permiten identificar las respuestas necesarias encaminadas a la recuperación del sistema con la menor afectación.

La caracterización socioeconómica en este caso se sustenta con información de datos abiertos gubernamentales. Para la ciudad de Bogotá el distrito cuenta con el portal IDECA, que es la Infraestructura de Datos Espaciales, creado con el objetivo de *“integrar el conjunto de datos, estándares, políticas, tecnologías y acuerdos institucionales, que, de forma sostenida, facilitan la producción, disponibilidad y acceso a la información geográfica del Distrito Capital, con el fin de apoyar su desarrollo social, económico y ambiental.”* (Instituto de Desarrollo Urbano, 2019).

El IDECA es una iniciativa estratégica de la administración distrital que promueve el trabajo articulado entre entidades productoras y usuarias de información; a través de diversas plataformas y aplicaciones como son, la Plataforma de Información Geográfica, el Portal de Datos Abiertos y Mapas Bogotá; toda la ciudadanía tiene disposición al acceso y uso de la información geográfica oficial de la capital.

La definición de políticas y estándares para la producción, disposición y documentación de los datos espaciales permite al distrito consolidar diferentes mapas que se pueden visualizar, consultar y descargar desde diferentes plataformas permitiendo a los ciudadanos descubrir los datos de la ciudad de una manera fácil y sencilla en temas sociales, económicos, ambientales, de movilidad, infraestructura, servicios públicos, gobierno y gestión pública entre otros. El conocimiento de dicha información tiene el propósito de fomentar propuestas de políticas sectoriales, así como la planeación del territorio.

En este proyecto se tendrá en cuenta la información de tres parámetros con información disponible en el IDECA y que se consideran útiles a la hora de caracterizar socioeconómica del área de interés. El primero consiste en identificar la estratificación socioeconómica de los predios, es una clasificación de los inmuebles residenciales principalmente para cobrar de manera diferencial los servicios públicos domiciliarios permitiendo asignar subsidios y cobrar contribuciones en esta área. Esta estratificación es realizada por cada ciudad y según la legislación los inmuebles residenciales se clasifican en máximo seis niveles, dependiendo de las características particulares de los municipios.

La segunda característica es el uso predominante de la manzana. El cual distingue las manzanas de diferentes sectores de Bogotá mostrando el principal uso en Tipo de Establecimientos Comerciales, aquí se encuentran las cuatro categorías establecidas que son: Actividad Industrial, Comercial, de Servicios, y Financiera.

La tercera y cuarta corresponde al valor de referencia en pesos por metro cuadrado de las manzanas y el avalúo comercial también medido en pesos colombianos por metro cuadrado.

**Tabla 7-22:** Relación entre criterios de caracterización socioeconómica.

Estrato	Uso	Valor de referencia \$/m <sup>2</sup>	Avalúo Comercial por manzana \$/m <sup>2</sup>	Nivel de Caracterización socioeconómica
1	Residencial	200.000 - 500.000	<1'000.000	Baja
2	Servicios (Universidades, colegios, otros)	500.001 - 1'000.000	1'000.000 - 2'000.000	Baja
3	Comercio - Hoteles	1'000.001 - 1'500.000	2'000.000 - 3'000.000	Media
4	Oficinas - Financiera	1'500.001 - 2'000.000	3'000.000 - 4'000.000	Media
5	Centros Médicos y Hospitales	2'000.001 - 3'000.000	4'000.000 - 5'000.000	Alta
6	Bodegas-Industrial	3'000.001 - 4'000.000	>5'000.000	Alta

Fuente: Elaboración propia

Se considera que entre mayor valor económico tenga el área de influencia del proyecto, mayor es el impacto del evento, lo cual reduce en cierta medida la capacidad de gestión, debido a que tomaría más tiempo reunir los recursos para llevar a cabo las medidas de respuesta ante el evento y así afectar los tiempos de respuesta (NIAC, 2009b; Rogers et al., 2012b).

Este criterio se ha definido de la misma forma que los anteriores, asignando a las características cualitativas conjuntos difusos con variables lingüística y funciones de membresía que puedan cuantificar y modelar el comportamiento determinado. La caracterización socioeconómica sostiene a una relación inversa con el parámetro Capacidad de Gestión, es decir, se considera que entre mayor valor económico tenga el área de influencia del proyecto menor será la capacidad de gestión de acuerdo con lo establecido en el numeral 7.3.3. La evaluación cuantitativa se realiza determinando las características de Estrato, Uso del suelo, Valor de referencia \$/m<sup>2</sup>, y Avalúo Comercial por manzana \$/m<sup>2</sup>, para así determinar valores en el universo de discurso entre 0 y 1.

**Tabla 7-23:** Relación capacidad de gestión y caracterización socioeconómica.

Nivel de Caracterización socioeconómica	Capacidad de Gestión	Valor asignado	Calificación
Alta	Baja	0	Asignar un valor entre 0 y 1 si las características socioeconómicas del área de la excavación están en niveles intermedios de los establecidos en la Tabla 7-22
Media	Media	0,5	
Baja o Nulo	Alta	1	

Fuente: Elaboración propia

### Resumen para el parámetro de capacidad de gestión

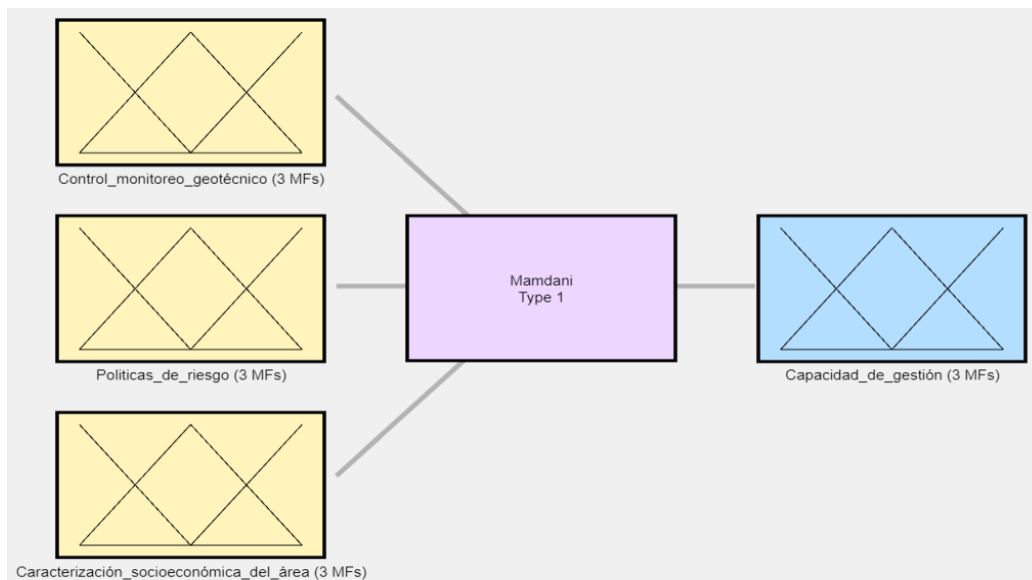
En la Tabla 7-24, se presentan las variables lingüísticas y demás términos del sistema difuso. En la Figura 7-24 se muestra la configuración del sistema difuso. Para la inferencia se generan las reglas SI\_ Entonces que se muestran en la Figura 7-28, seguido de las superficies de conocimiento en la Figura 7-26 para el parámetro de Capacidad de Gestión.



**Tabla 7-24:** Sistema difuso para el parámetro capacidad de gestión.

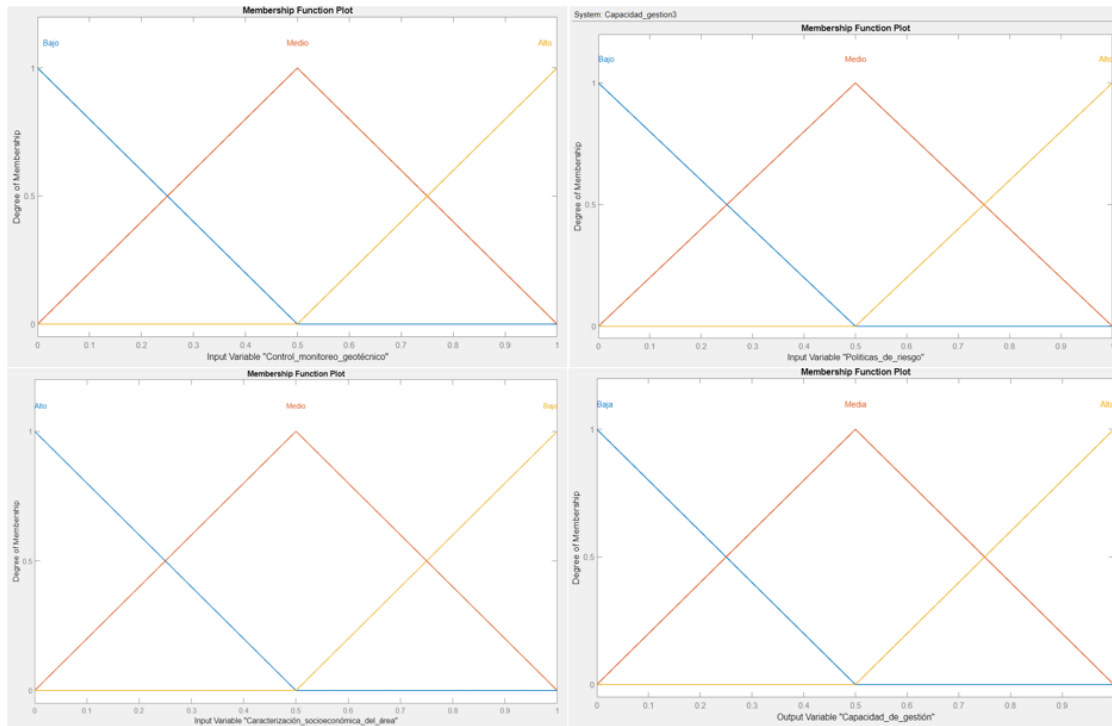
Parámetro de resiliencia	ENTRADA				SALIDA			
	Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía	Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía
Capacidad de gestión	Control y monitoreo geotécnico	0 - 1	Alto	trimf [0.5 1 1.5]	Capacidad de Gestión	0 - 1	Alta	trimf [0.5 1 1.5]
			Medio	trimf [0 0.5 1]				
			Bajo	trimf [-0.5 0 0.5]				
	Políticas de gestión frente al riesgos	0 - 1	Alto	trimf [0.5 1 1.5]			Media	trimf [0 0.5 1]
			Medio	trimf [0 0.5 1]				
			Bajo	trimf [-0.5 0 0.5]				
	Caracterización Socioeconómica del área.	0-1	Alto	trimf [-0.5 0 0.5]			Baja	trimf [-0.5 0 0.5]
			Medio	trimf [0 0.5 1]				
			Bajo	trimf [0.5 1 1.5]				

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7-24:** Configuración sistema difuso para la Capacidad de Gestión.

Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

**Figura 7-25:** Funciones de membresía de los criterios de entrada y salida.



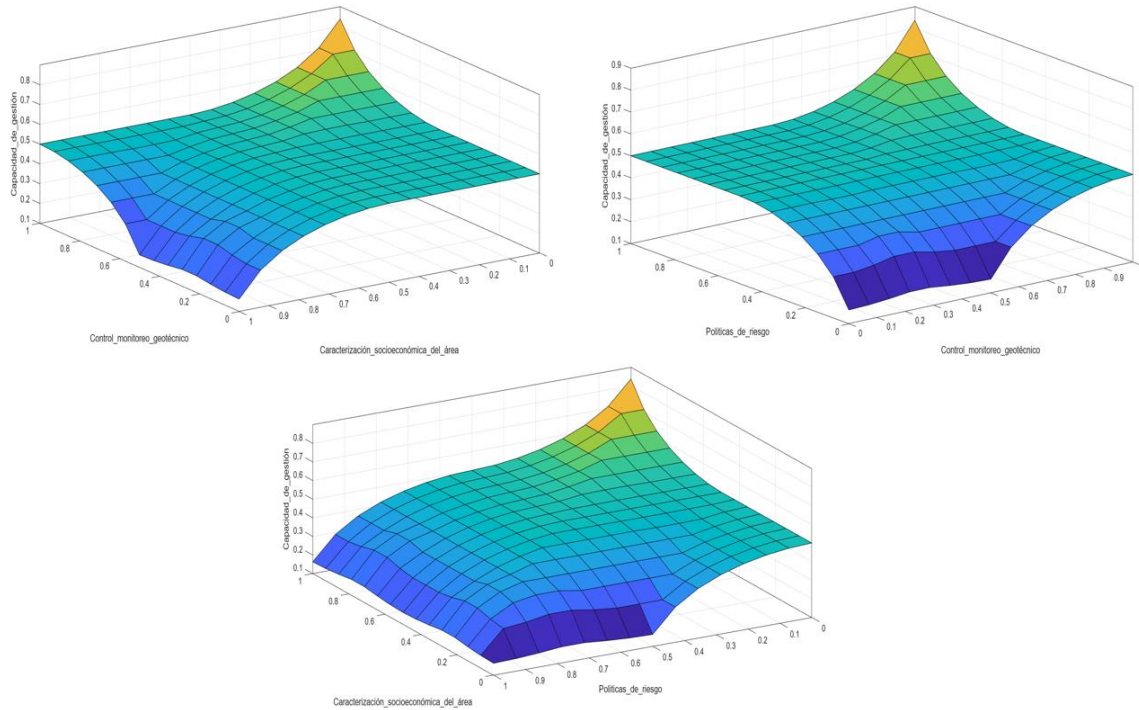
Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

**Tabla 7-25:** Reglas para el parámetro de capacidad de gestión.

Parámetro	SI (Entrada)			Entonces (Salida)
CAPACIDAD DE GESTIÓN	Control y monitoreo geotécnico	Políticas de riesgos.	Caracterización socio económica del área	Capacidad de Gestión
	Alto	Alto	Bajo	Alto
			Medio	Alto
			Alto	Medio
		Medio	Bajo	Alto
			Medio	Medio
			Alto	Medio
		Bajo	Bajo	Medio
			Medio	Medio
			Alto	Bajo
	Medio	Alto	Bajo	Alto
			Medio	Medio
			Alto	Bajo
		Medio	Bajo	Medio
			Medio	Medio
			Alto	Bajo
		Bajo	Bajo	Medio
			Medio	Bajo
			Alto	Bajo
	Bajo	Alto	Bajo	Alto
			Medio	Medio
			Alto	Bajo
		Medio	Bajo	Medio
			Medio	Medio
Alto			Bajo	
Bajo		Bajo	Bajo	
		Medio	Bajo	
		Alto	Bajo	

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7-26:** Relaciones difusas entre parámetros de capacidad de gestión.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

Las superficies representan de manera adecuada el comportamiento para parámetro de Capacidad de Gestión pues se ajustaron los universos de discurso y las variables lingüísticas para que cuando exista un control y monitoreo en el sistema, aplicado de manera adecuada, se refleje en un aumento en la Capacidad de gestión, también es posible ver por medio de las reglas de inferencia, la relación entre las políticas de gestión y la capacidad de gestión que establecen una proporcionalidad creciente, en cambio para la relación de la capacidad de gestión con la caracterización socioeconómica es inversa, así es posible obtener valores cuantitativos de los criterios definidos.

## 7.4 Recuperación

Como se presentó anteriormente, la recuperación comprende los esfuerzos organizativos para reparar rápidamente el sistema dañado y refiere al tiempo que tarda el sistema en volver al equilibrio una vez se tengan las medidas de la etapa anterior.

La recuperación encaja en las Respuestas del marco DPSIR, este caso, se considera importante determinar el nivel de intervención requerido para retomar el normal funcionamiento identificando si se requiere de mejoramiento, reparación o reconstrucción en la excavación y el área afectada. Adicionalmente se define el rendimiento esperado en el restablecimiento de los servicios públicos en el área en caso de que estos hayan sido interrumpidos a causa de un evento.

### 7.4.1 Nivel de intervención

En la mayoría de los planes de gestión del riesgo, existe la evaluación de los niveles de intervención que requiere el sistema después de un evento disruptivo, de acuerdo con el nivel de daño sufrido. Por tanto, en este informe se definen tres niveles de intervención para el sistema como escenarios de respuesta. A continuación, se relaciona la intervención en términos de acciones necesarias según el nivel de daño detectado junto con un estimativo de tiempo requerido.

**Tabla 7-26:** Relación entre el nivel de intervención y nivel de daño.

Nivel de Intervención - Acciones	Nivel de daño	Tiempos de intervención
Mejoramiento	Daños son menores que no afectan la funcionalidad del sistema	Días
Reparación	Daños son menores que afectan la funcionalidad del sistema en un 50%	Semanas
Reconstrucción	Daños son mayores y afectan la funcionalidad del sistema en un 80 a 100%	Meses

Fuente: Elaboración propia

## 7.4.2 Escenarios de respuesta

Adicional al nivel de intervención para el cálculo del parámetro de Recuperación, se define el rendimiento esperado de todos los sistemas de servicios públicos y de transporte o partes de los sistemas que dan servicio a la ciudad en términos del número de días necesarios para restablecer el servicio en diferentes grados (es decir, 90%, 95% y 100%).

**Tabla 7-27:** Niveles de recuperación según escenarios de respuesta.

Categoría	Escenarios de Respuesta
I	Restablecer el 100% de los niveles de servicio en cuatro horas
II	Restablecer el 90% del servicio en 72 horas, el 95% en 30 días y el 100% en cuatro meses
III	Reanudar el 90% del servicio en 72 h, el 95% en 30 días y el 100% en un año

Fuente: Elaboración propia

Como se presentó, las características dadas a cada uno de los parámetros de resiliencia de acuerdo con los conceptos definidos son variables tanto cuantitativas que se pueden establecer en rangos fijos, como variables cualitativas que dependen del criterio adoptado por normativas y manuales; por tanto los valores de ponderación para realizar la agregación de los criterios adoptados en el cálculo de cada uno de los parámetros de resiliencia, puede ser calculados con la aplicación de modelos de inferencia difusa, los cuales reducen la incertidumbre en el establecimiento de las ponderaciones, dejando de lado posibles consideraciones subjetivas del evaluador. Por lo tanto, se aplica el modelo basado en lógica difusa definiendo para cada característica los universos de discurso, los términos lingüísticos y las funciones de membresía para cada una de las variables lingüísticas de entrada y salida del controlador, estableciendo el modelo de conocimiento bajo las consideraciones mostradas en este numeral.

### Control difuso

Para la valoración en términos cuantitativos de la recuperación se establece una relación inversa entre el nivel de intervención y la capacidad de recuperación del sistema, donde a

medida que el nivel de intervención sube, el nivel de Recuperación baja. También para los Escenarios de respuesta, de acuerdo con su categoría, los cuales disminuyen el criterio de recuperación a medida que incrementa el escenario de respuesta. En la Tabla 7-28 se presenta lo descrito.

**Tabla 7-28:** Relación entre criterios de Recuperación.

Nivel de Recuperación	Nivel de Intervención	Categoría de Respuesta	Valor en la cuantificación	Calificación
Alta	Mejoramiento	I	1	Asignar un valor entre 0 y 0,5 si las condiciones están en niveles intermedios de los establecidos en la Tabla 7-26 y Tabla 7-27 <b>Tabla 7-18</b>
Media	Reparación	II	0,5	
Baja	Reconstrucción	III	0	

Fuente: Elaboración propia

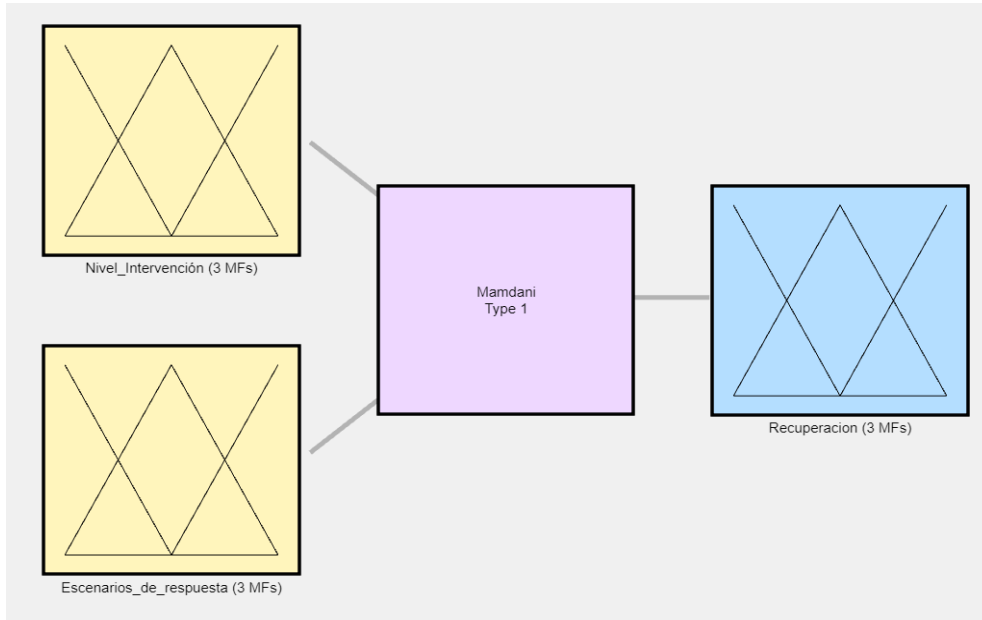
A continuación, se presenta la determinación del sistema difuso para la Recuperación con las variables lingüísticas de entrada y salida, universo de discurso entre 0 – 1 que corresponden a los valores que puede tomar la cuantificación de cada variable y las funciones de membresía, que para ambos criterios son triangulares. Seguido, en la Figura 7-27, Figura 7-28 y Figura 7-29 se representa la composición del sistema difuso, las funciones de membresía para cada variable, y la superficie de conocimiento de derivado de las reglas de inferencia mostradas en la Tabla 7-30.

**Tabla 7-29:** Determinación del sistema difuso para el parámetro de recuperación.

Parámetro de resiliencia	Entrada				Salida			
	Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía	Variable lingüística	Universo de discurso	Términos lingüísticos	Funciones de membresía
Recuperación	Nivel de intervención	0 - 1	Mejoramiento	trimf [0.5 1 1.5]	Recuperación	0 - 1	Alta	trimf [0.5 1 1.5]
			Reparación	trimf [0 0.5 1]				
			Reconstrucción	trimf [-0.5 0 0.5]				
	Escenarios de respuesta	0 - 1	Categoría I	trimf [0.5 1 1.5]			Media	trimf [0 0.5 1]
			Categoría II	trimf [0 0.5 1]				
			categoría III	trimf [-0.5 0 0.5]				

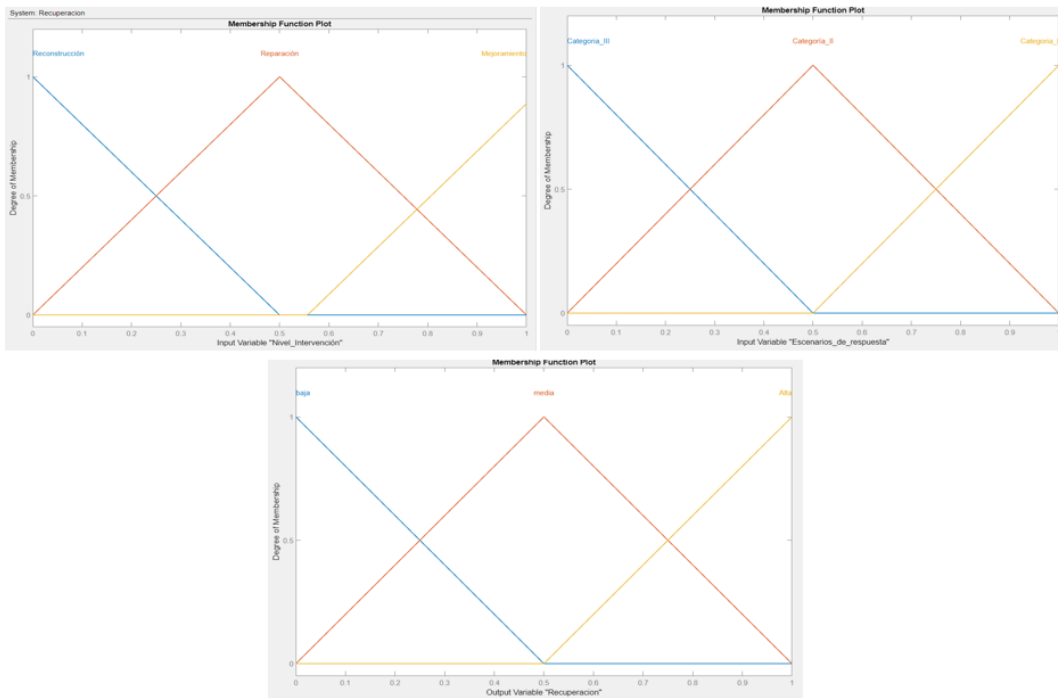
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7-27:** Configuración sistema difuso para la Recuperación.



Fuente: elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

**Figura 7-28:** Funciones de membresía de cada criterio y salida.



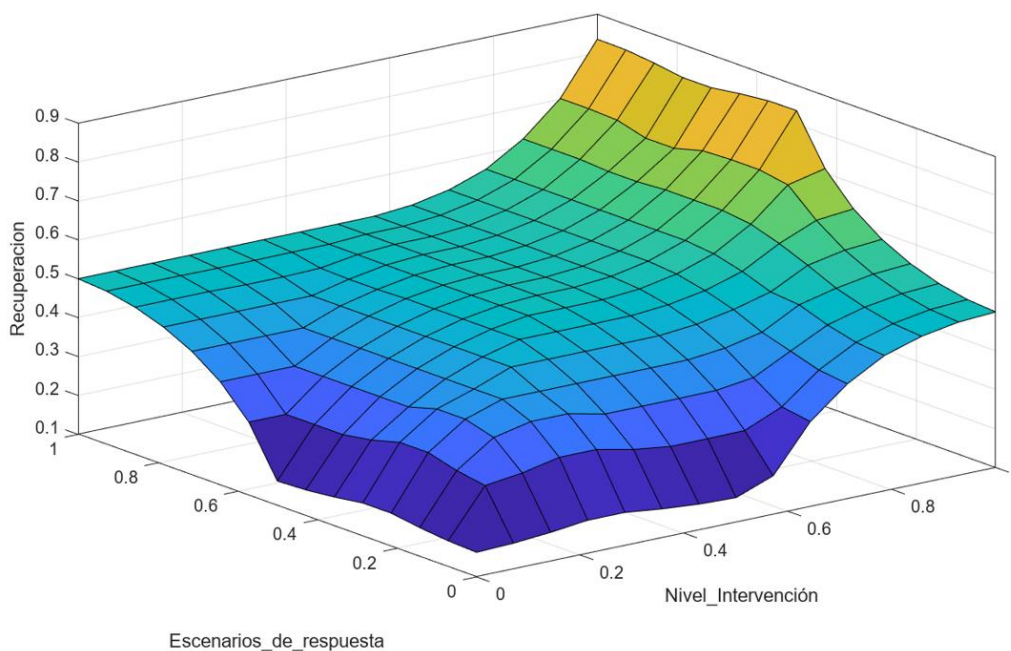
Fuente: elaboración propia, captura tomada del software Matlab.



**Tabla 7-30:** Reglas para el parámetro de Recuperación.

Parámetro	SI (Entrada)		Entonces (Salida)
	Nivel de intervención	Escenarios de respuesta	Recuperación
RECUPERACIÓN	Mejoramiento	Categoría I	Alta
		Categoría II	Alta
		Categoría III	Media
	Reparación	Categoría I	Media
		Categoría II	Media
		Categoría III	Baja
	Reconstrucción	Categoría I	Media
		Categoría II	Baja
		Categoría III	Baja

Fuente: elaboración propia.

**Figura 7-29:** Relación difusas entre parámetros de recuperación.

Fuente: elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

La superficie generada por las reglas de inferencia es consistente con el comportamiento establecido para el parámetro de Recuperación con los criterios del Nivel de Intervención y Escenarios de Respuesta.

## **8. Cálculo de parámetros resilientes para el caso de estudio**

En este capítulo se amplía información del estudio de caso donde se tiene en consideración las particularidades de los reportes hechos por la Universidad Nacional de Colombia en el estudio “ESTUDIO PARA DETERMINAR LAS POSIBLES CAUSAS QUE AFECTARON LAS REDES DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO EN EL SECTOR COMPRENDIDO ENTRE LAS CALLES 97 Y 100 Y LAS CARRERAS 11 Y 11 A CONTRATO INTERADMINISTRATIVO UNAL-EAAB 1-02-26200-0841-2011” documento reservado y no publicado, además de los reportes hechos por la EAAB de los archivos del caso Green Office, donde se describen las principales afectaciones de la excavación a las redes de servicio público de acueducto y alcantarillado, las afectaciones a la Calle 11 y el espacio público circundante. A partir de esta información se aplicarán cada uno de los criterios definidos en el capítulo 6, y para la evaluación del índice de resiliencia se tomarán las valoraciones descritas en el capítulo 7.

El cálculo de resiliencia se hace para dos tiempos determinados, el primero se basa en todas las condiciones previas al evento disruptivo, y el segundo tiempo es después del evento. En este análisis se considera que el evento disruptivo es la falla de fondo ocurrida en la excavación durante la construcción.

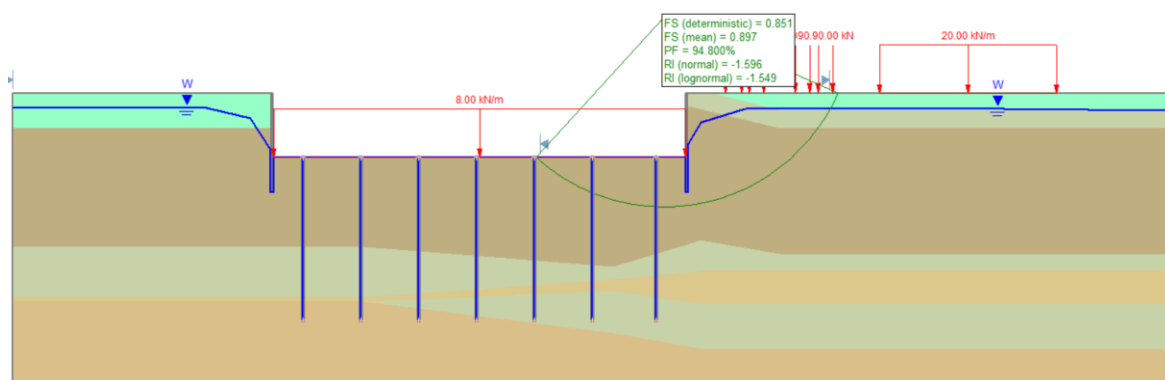
## 8.1 Parámetros de resiliencia en t1

### 8.1.1 Robustez

Para la cuantificación de la robustez antes del evento de falla de la excavación, se verifica con las condiciones que corresponden al diseño, ya que el factor de seguridad y la probabilidad de falla deben ser calculadas en esta etapa, así como las deformaciones esperadas. Por lo tanto, los valores presentados para los tres criterios definidos corresponden a los modelos de análisis con una pantalla de 17 m de profundidad, grosor de 40 cm y la excavación de 3 sótanos.

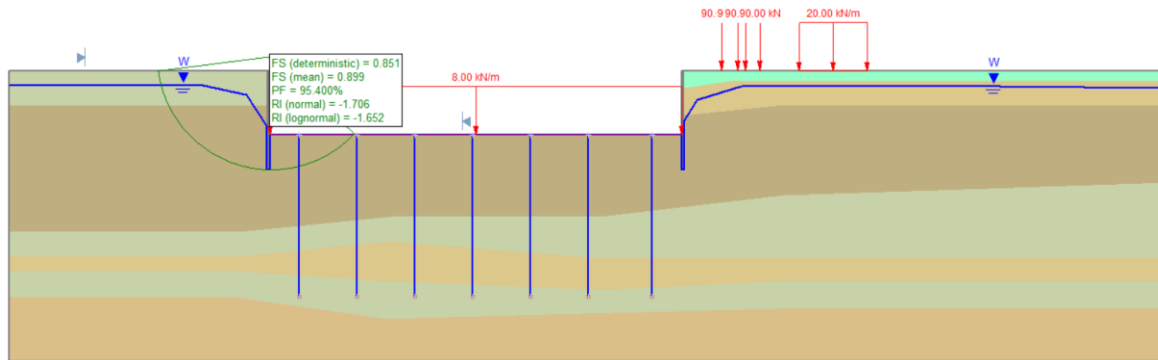
**Factor de seguridad y probabilidad de Falla:** Los modelos de análisis geotécnicos generados con las condiciones de suelo y la configuración de elementos de cimentación de la excavación del estudio de suelos original, junto con los parámetros geotécnicos como resultado de la exploración realizada para el reporte de la Universidad Nacional, dan como resultado un factor de seguridad de 0,894 con una probabilidad de falla del 78% para la sección de análisis 1, y de 0,734 con probabilidad de falla del 100% para la sección 2; condiciones que no cumplen las especificaciones del código sismo resistente ni las mínimas recomendadas para los diseños de una excavación. En consecuencia, se puede decir que la falla de la excavación era completamente predecible y por tanto evitable, si los análisis geotécnicos de estabilidad se hubieran realizado con el rigor requerido por las solicitaciones del proyecto, con las condiciones de suelos encontradas.

**Figura 8-1:** Factor de seguridad y probabilidad de falla sección 1.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Slide.

**Figura 8-2:** Factor de seguridad y probabilidad de falla sección 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Slide.

Usando los valores presentados en las figuras anteriores, para el cálculo del parámetro de robustez se tomará el valor más desfavorable que es el factor de seguridad de la sección 2 (0,756), como la probabilidad de falla en esta sección es de 100%, pero en el control difuso se estableció un límite máximo de 20% como característica del conjunto difuso “Falla” se asignara el máximo valor, que representa las características de inestabilidad de la excavación.

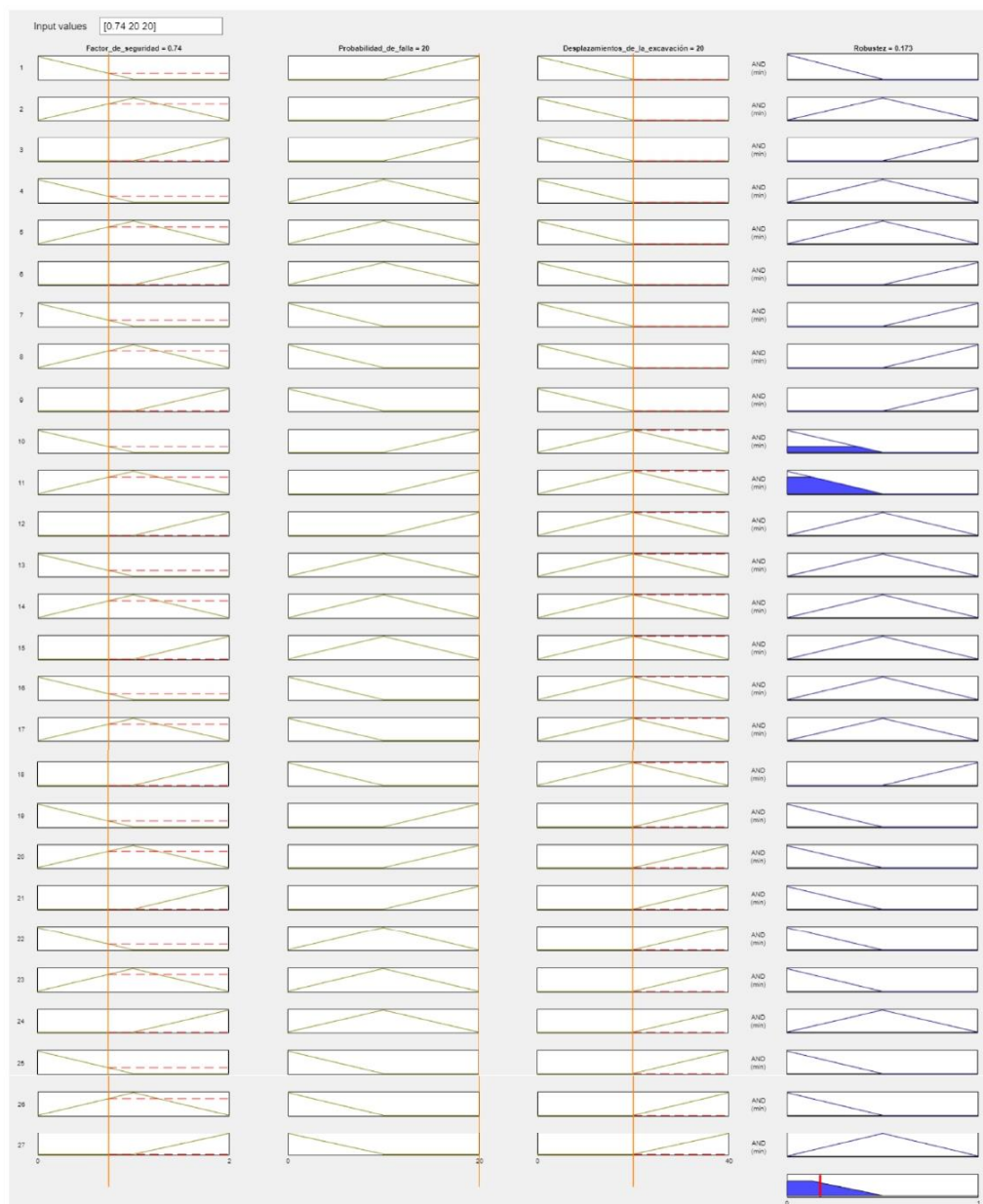
**Análisis de deformaciones:** Corresponde a los desplazamientos evidenciados en el área previo al evento limitados por los máximos permisibles para evitar daños a las edificaciones existente. De los reportes realizados por la Alcaldía Local de Chapinero, quien realizaba el seguimiento a la licencia de construcción numero 08-4-0946, se puede extraer que antes del evento el entorno se encontraba en condiciones normales de uso sin efectos adversos a la movilidad de los peatones o la vía, igualmente en bitácora de obra no se reportaron deformaciones en las paredes o el fondo de lo que llevaba de avance la excavación, por tanto, con base en los criterios de deformación se da una calificación de 20 mm para la cuantificación del criterio de deformaciones en el entorno.

Con los valores determinados se realiza el cálculo de la inferencia difusa en el software Matlab y el aplicativo Fuzzy Logic Designer, con los valores de entrada [0.74, 20, 20]. En la siguiente figura puede verse las funciones de membresía de los conjuntos difusos de

cada una de las reglas de inferencia, con el resultado calculado para la robustez el cual es de 0,173 que pertenece al termino lingüístico de salida “No Robusto”. En la

Tabla 8-1 se resumen los datos de cálculo para la robustez.

**Figura 8-3:** Inferencia del control difuso para la robustez en t1.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

**Tabla 8-1:** Valoración de criterios y parámetro de robustez en t1

Criterio	Valor asignado	Robustez t1
Factor de seguridad	0,74	0,173
Probabilidad de Falla	20	
Deformaciones en la excavación	20	

Fuente: Elaboración propia

Es claro que la excavación desde la etapa de diseño no cumplió con las especificaciones mínimas establecidas en el código Colombiano Sismo Resistente de la época en que se proyectó el edificio Green Office (2008), lo que se puede establecer como un evento evitable desde el punto de vista ingenieril. Dando como resultado en una etapa previa al evento un sistema No Robusto.

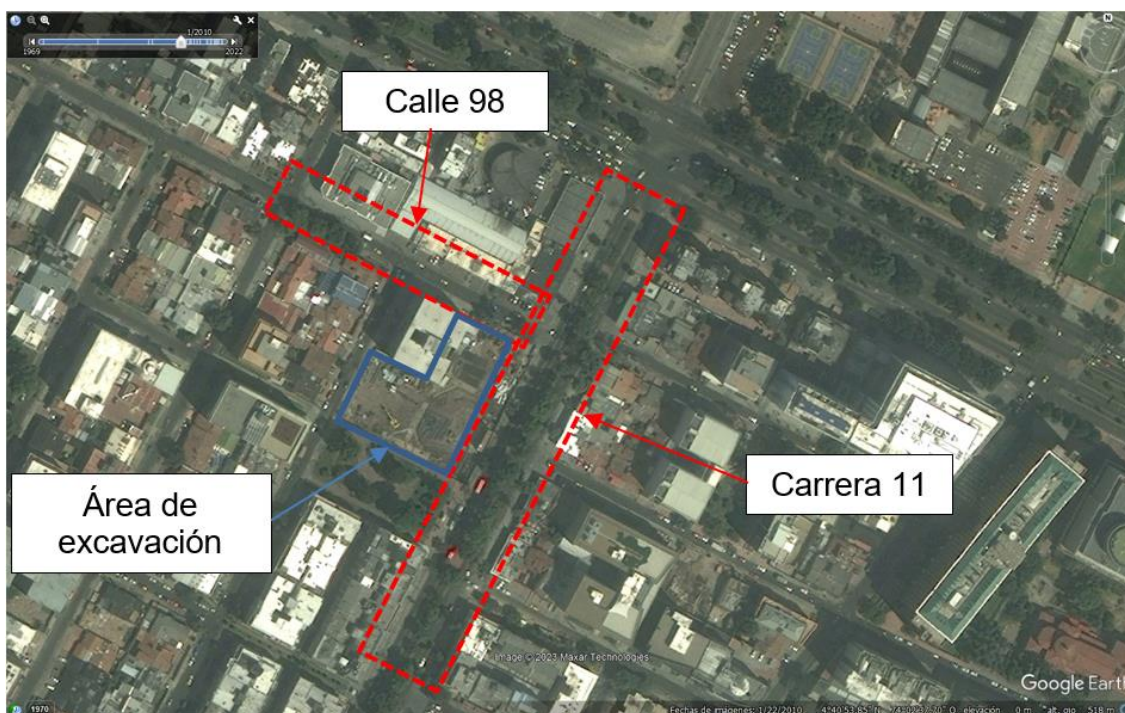
### 8.1.2 Redundancia

A continuación, se describen las consideraciones para el cálculo de la Redundancia de la excavación en estudio, para ello se revisan las condiciones de las vías adyacente, que son la Carrera 11 y la Calle 98, el estado y categoría de las redes de servicios publico domiciliarios que tienen una influencia en el área de análisis y por ultimo las deformaciones o asentamientos del espacio público que conforman el entorno de la excavación.

**Nivel de Servicio de las Vías:** En los primeros informes realizados por el antiguo Fondo de previsión y Atención de Emergencias (FOPAE) ahora Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) se menciona que, en las vías, parque y andén circundante a la excavación solo se encontraban asentamientos y diferenciales que afectaba los prefabricados, lo cual coincide con el reporte de la Alcaldía Local de Chapinero en el seguimiento de la obra, y solo hasta el 10 de octubre donde se identifican las primeras afectaciones, no se observaban colapso del suelo antes al ocurrido el día 14 de diciembre de 2011.

Con el fin de establecer el nivel de servicio de las vías perimetrales a la obra se revisó la temporalidad de imágenes satelitales disponible en Google Earth® de la zona. Allí se encontró una imagen del 22 de enero de 2010, donde es posible evidenciar que la Carrera 11 y Calle 98 no presenta alto flujo vehicular (Figura 8-4), adicional a esto, en las fotos tomadas por la EAAB, las condiciones de la vía **sin considerar los hundimientos** provocados por la falla de la excavación denotan que la vía presentaba buenas condiciones. Sin embargo, teniendo en cuenta que la zona tiene una influencia comercial y empresarial se considera que el nivel de servicio debido a la congestión en horas pico debe ser menor al presentado en la imagen satelital, esto se confirma con información del IDU que menciona en el plan de manejo de tránsito complementario realizado a causa de la emergencia ocasionada por el hundimiento, que: *“En la hora pico (de la tarde) circulan por el punto un promedio de 2.400 vehículos por hora”* (IDU, 2012), por lo que se infiere que las vías, tanto la Carrera 11 como la Calle 98, tienen un nivel de servicio entre B y C, y según los criterios de calificación de la Tabla 7-11 se adopta un valor de 0,7 para los niveles de servicio previos al evento de falla de las vías perimetrales. En la Fotografía 8-1 y Fotografía 8-2 se puede evidenciar las condiciones descritas.

**Figura 8-4:** Condiciones de la Carrera 11 y Calle 98 (22/01/2010).



Fuente: Captura tomada de Google Earth.

**Fotografía 8-1:** Estados de la vía Calle 98 entre Carreras 11 y 11a.



Fuente: EAAB DIC 2010

**Fotografía 8-2:** Estados de la vía Carrera 11 entre calles 99 y 97a.



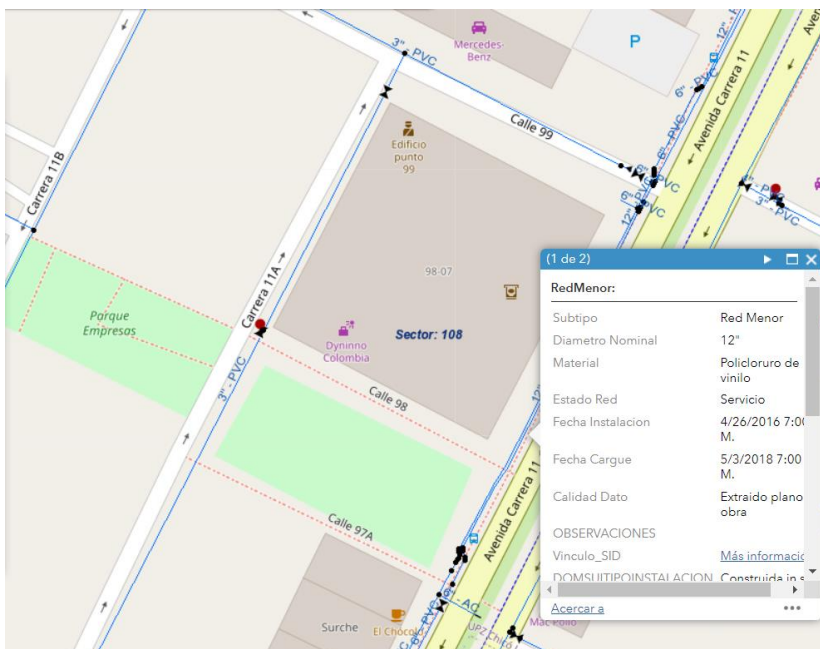
Fuente: EAAB DIC 2010



**Redes de servicios:** El sector donde se encuentran localizado el edificio Green Office, es un área mixta, ya que confluyen espacios residenciales, empresariales y comerciales que requieren de servicios públicos a nivel residencial y comercial. En la búsqueda de información correspondiente a la distribución de redes de servicios públicos alrededor del proyecto, solo fue posible encontrar las redes de acueducto, alcantarillado pluvial y sanitario. Sin embargo, consideramos esta información como la más relevante ya que la mayor afectación en el área fue la ocasionada al sistema de acueducto.

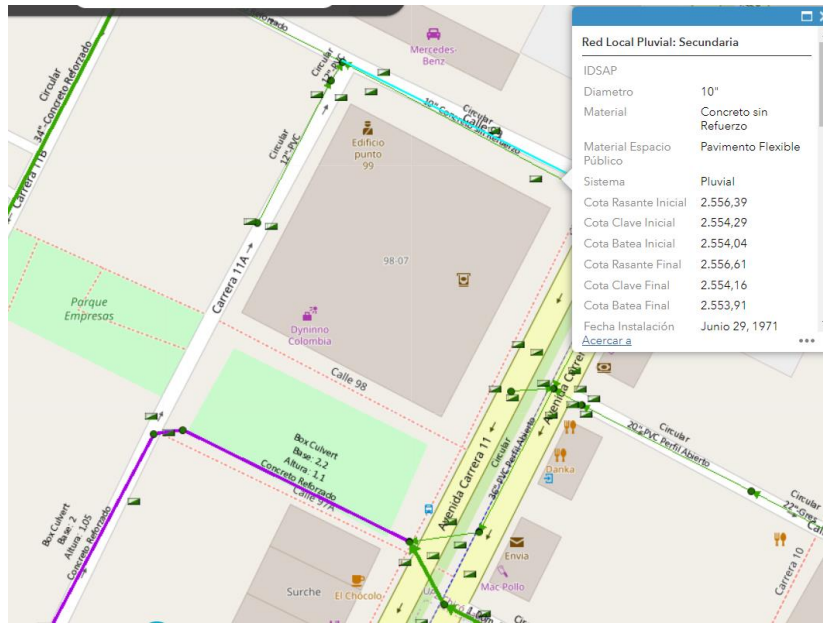
De acuerdo con el Sistema de Información Geográfico EAB, la red de acueducto y alcantarillado presente en la zona se distribuye como se muestra en la Figura 8-5, Figura 8-6 y Figura 8-7 que corresponden a las redes de acueducto, alcantarillado sanitario y pluvial respectivamente, todas con categoría de red secundaria. Los expedientes del proyecto no describen ningún daño evidenciado antes del evento de falla por lo que se ha dado una calificación 0,5, según los criterios de la Tabla 7-13.

**Figura 8-5:** Distribución de la red de acueducto colindante al proyecto.



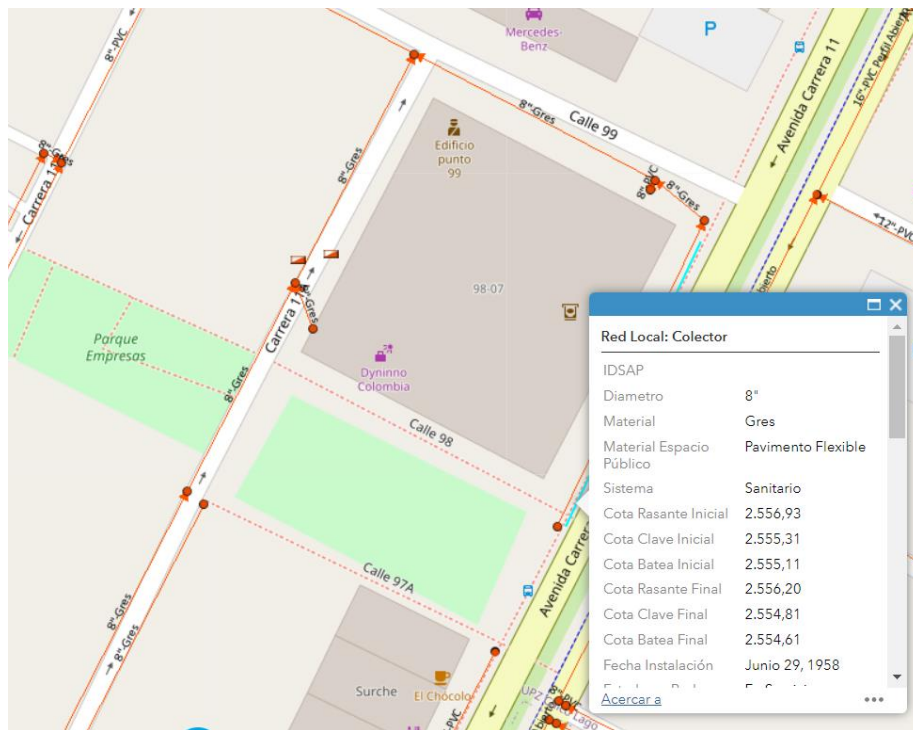
Fuente: IDECA 2023

**Figura 8-6:** Distribución de la red de alcantarillado pluvial colindante.



Fuente: IDECA 2023

**Figura 8-7:** Distribución de la red de alcantarillado sanitario colindante.

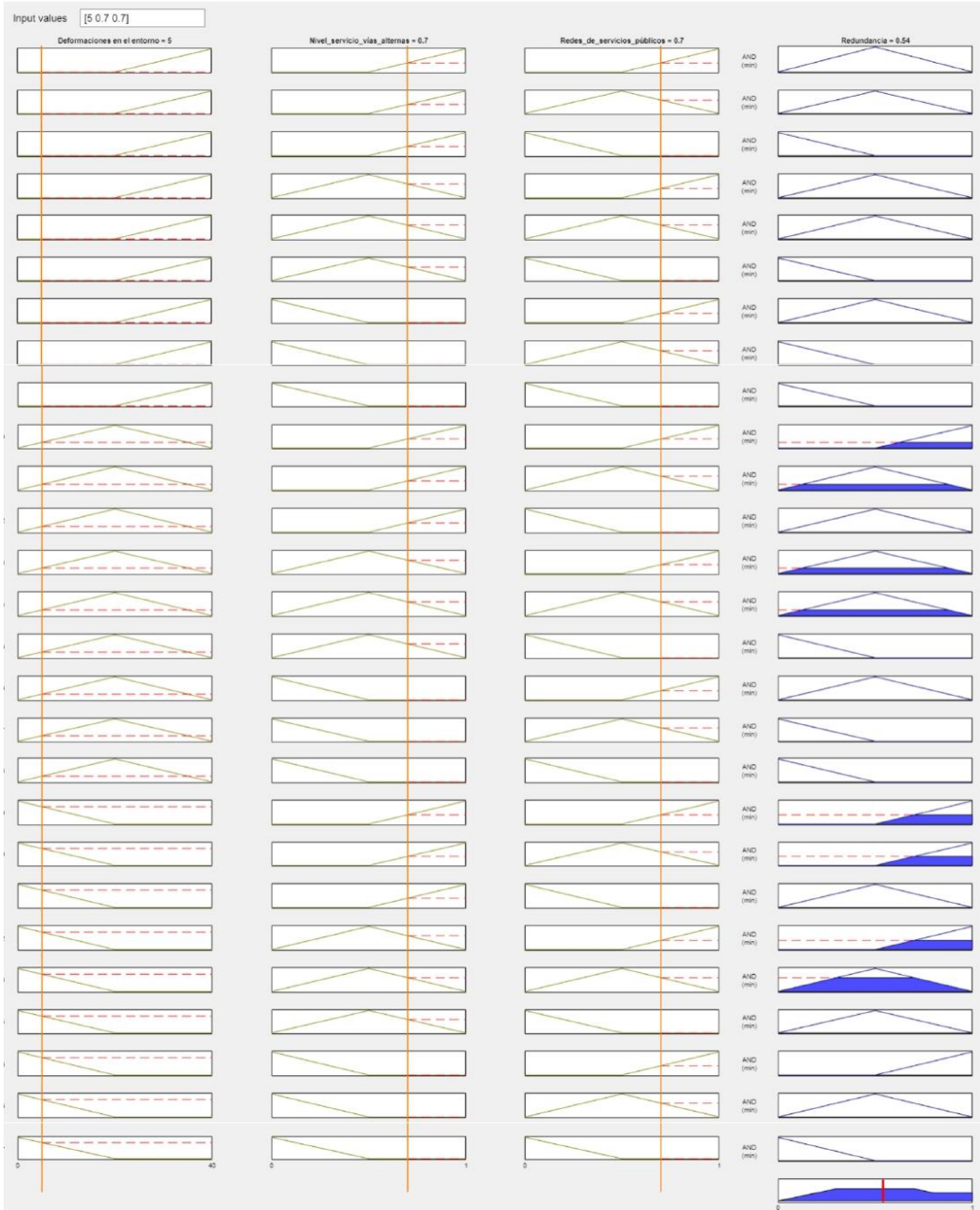


Fuente: IDECA 2023

**Deformaciones en el entorno:** Según los informes de Visita Técnica realizados por la Oficina Asesora de Obras de la Alcaldía Local de Chapinero, como producto del seguimiento y control de la licencia de construcción, no se especifican daños a los espacios adyacentes a la obra, en las fechas posteriores al evento. Solo se especifica una inconformidad por el Plan de Manejo de Tráfico realizado por la obra, el cual no estaba siendo implementado de manera correcta.

Se puede concluir que antes del evento el entorno se encontraba en condiciones normales de uso sin efectos adversos a la movilidad de los peatones o la vía, por tanto, con base en los criterios se da una calificación de 5 para la cuantificación del criterio de deformaciones en el entorno. En la siguiente figura se presentan los valores de entrada producto de la revisión de las condiciones previas al evento de los niveles de servicio de las vías, Redes de Servicios y de las deformaciones en el entorno circundante a la excavación, y el resultado de la inferencia que determina la Redundancia en t1 en 0,54, para una calificación de Redundancia Media.

**Figura 8-8:** Inferencia del control difuso para la redundancia en t1.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada del software Matlab.

**Tabla 8-2:** Valoración de criterios y parámetro de Redundancia en t1

Criterio	Valor asignado	Redundancia en t1
Nivel de servicio de vías adyacentes	0,7	0,54
Redes de servicios	0,7	
Deformaciones en el entorno	5	

Fuente: Elaboración propia

### 8.1.3 Capacidad de gestión

En este numeral se describen las consideraciones para el cálculo del parámetro resiliente Capacidad de gestión, para ello se revisan las consideraciones del geotecnista diseñador sobre el control y monitoreo a implementar en el proyecto, como segunda medida se revisan las políticas de gestión frente a la emergencia del área, y la caracterización socioeconómica del área donde se encuentra la excavación.

**Control y Monitoreo geotécnico:** El estudio de suelos recomienda un monitoreo geotécnico con el fin de verificar el comportamiento de los muros pantalla, revidar los niveles de aguay las deformaciones en las vías y edificaciones vecinas al proyecto, la instrumentación sugerida constaba de:

- Inclínómetros: 6 inclinómetros con una longitud igual a la alcanzada por los muros pantalla (17 m) con lecturas semanales.
- Piezómetros: 5 piezómetros tipo Casagrande con una longitud de 12 m de profundidad, se sugiere lecturas semanales.
- Platinas de control topográfico: Instaladas a 40 m de los bordes de la excavación sobre edificaciones vecinas y vías, con lecturas semanales.

Con el monitoreo sugerido es posible llevar un seguimiento y control de las condiciones de la excavación, sin embargo, no es posible determinar si alguno de los elementos fue

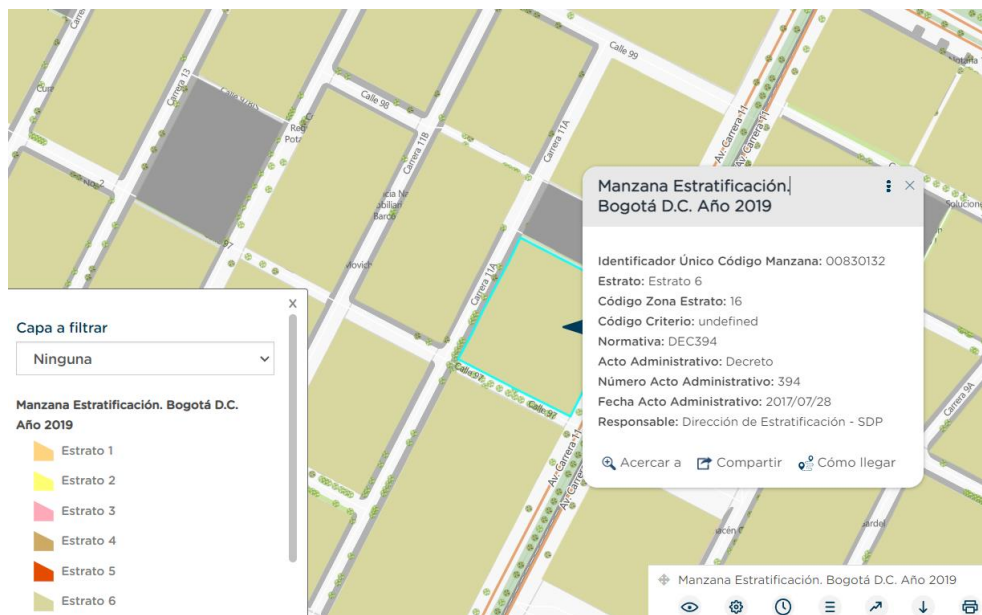
instalado durante la construcción, por lo que se asigna un valor de 0,7 de acuerdo a los criterios establecidos.

**Políticas de gestión frente al riesgo:** Como se mostró en el numeral 7.3.2 la ciudad de Bogotá cuenta con un sistema de alerta para la atención de emergencias y articula las organizaciones prestadoras de atención para la respuesta oportuna de acuerdo con el tipo y magnitud de los eventos. Para el tiempo previo al evento la calificación puede corresponder al simple hecho de la existencia o no de entidades para la atención, sin embargo, la verdadera verificación de la capacidad de gestión por el criterio definido se ve reflejado en el tiempo después del evento, es en este momento que se puede constatar si las políticas están siendo efectivas y portan a la resiliencia el sistema. Por lo tanto, a este criterio en el momento previo al evento se da la calificación de 0,8 dado a la existencia de políticas de gestión del riesgo a nivel distrital, con planes de atención y entidades respondientes ante la emergencia.

**Caracterización socioeconómica:** El sector donde se localiza la excavación se caracteriza por tener un uso de suelo mixto, ya que en la zona se encuentran áreas de uso residencial, comercial, turístico y financiero. A continuación, se presentan la evaluación de los criterios establecidos en el numeral 7.3.3 para la caracterización socioeconómica, con ayuda de la información del portal IDECA.

- Estrato: Según el portal de mapas de Bogotá, la manzana donde se localiza el proyecto se encuentra en una zona estrato 6, que representa el mayor estrato establecido por el distrito.

**Figura 8-9:** Estrato manzana donde se implanta el edificio Green Office.



Fuente: IDECA 2023

- Uso predominante de la manzana: El uso de la manzana tiene un uso comercial.

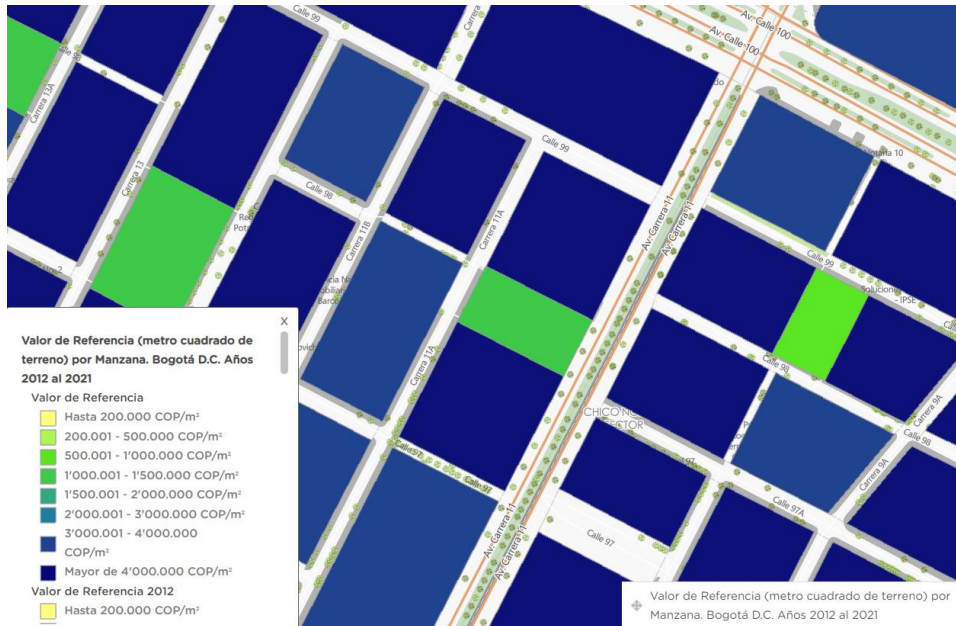
**Figura 8-10:** Uso predominante de la manzana donde se localiza el Green Office.



Fuente: IDECA 2023

- Valor de referencia en pesos por metro cuadrado: Como se puede ver en la **Figura 8-11**, el valor de referencia para la manzana donde se localiza el edificio tiene la valoración más alta, avaluada en más de 4'000.000 COP/m<sup>2</sup>.

**Figura 8-11:** Valor de referencia m<sup>2</sup> donde se localiza el Green Office.



Fuente: IDECA 2023

- Avalúo comercial: El avalúo comercial por manzana de acuerdo con los datos registrados en el portal corresponde a 7'100.383 \$/m<sup>2</sup>, siendo mayor que el máximo de la escala establecida.



**Figura 8-12:** Avalúo comercial por manzana (%/m<sup>2</sup>)



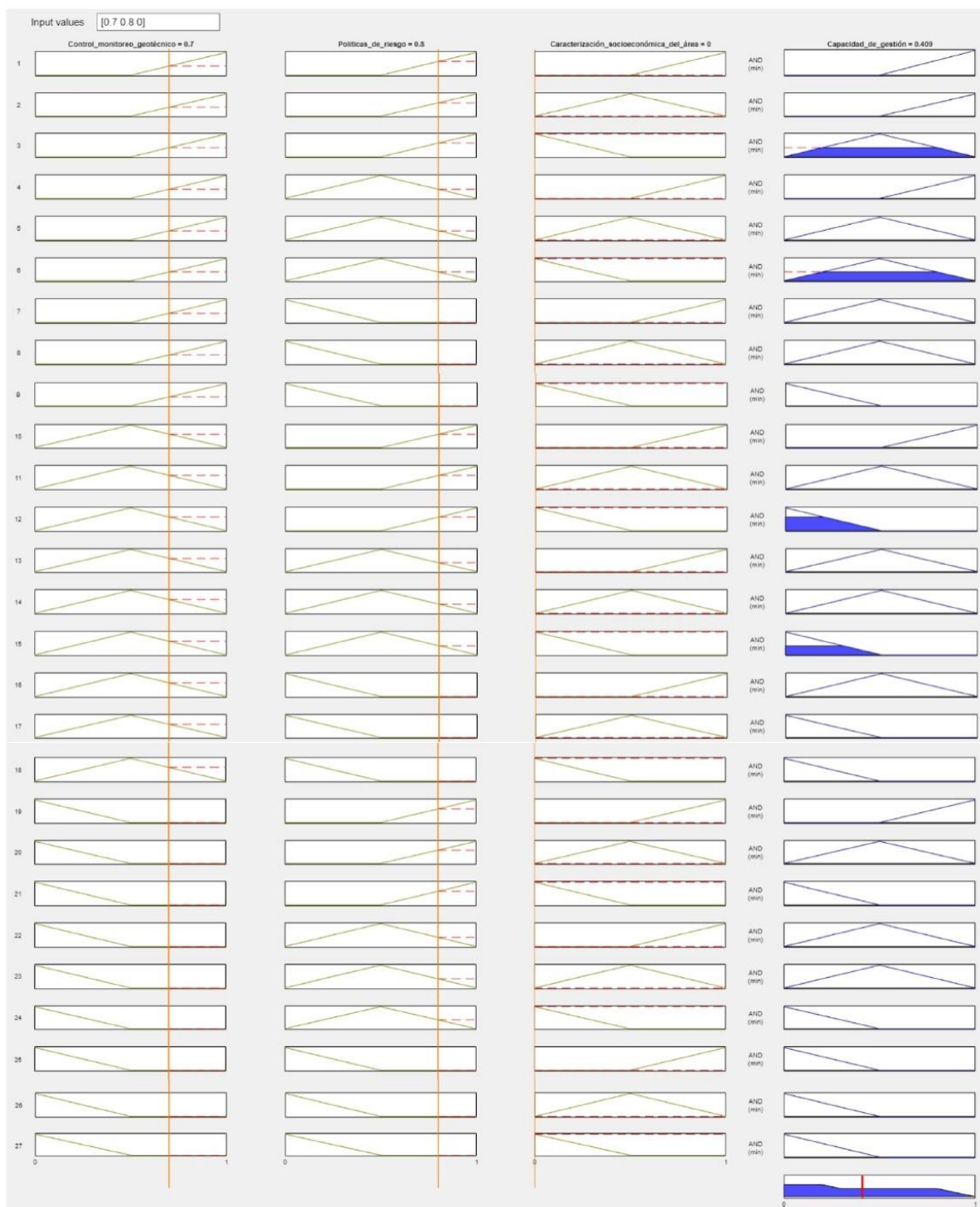
Fuente: IDECA 2023

De acuerdo con lo establecido en la Tabla 7-22, el nivel de Caracterización socioeconómica de la manzana donde se localiza el Green Office, así como su alrededor, es Alta, ya que presenta los mayores valores de dicha tabla. Por tanto, se asigna un valor de 0 para la cuantificación del nivel de capacidad de gestión, ya que este alto valor socioeconómico representa una mayor inversión de recursos al momento de tener que recuperar el área luego de un evento.

Con los valores de cada criterio, se usa el sistema difuso establecido para el parámetro capacidad de gestión, en la

**Figura 8-13** se puede ver como se establece la inferencia difusa y el resultado de la salida que corresponde al valor de capacidad de gestión. Seguido, se presenta una tabla resumen con el valor calculado.

**Figura 8-13:** Inferencia del control difuso para la Capacidad de gestión en t1.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-3:** Valoración de criterios y parámetro Capacidad de gestión en t1.

Criterio	Valor asignado	Capacidad de gestión en t1
Control y Monitoreo Geotécnico	0,7	0,41
Políticas de gestión frente al riesgo	0,8	
Caracterización socioeconómica	0	

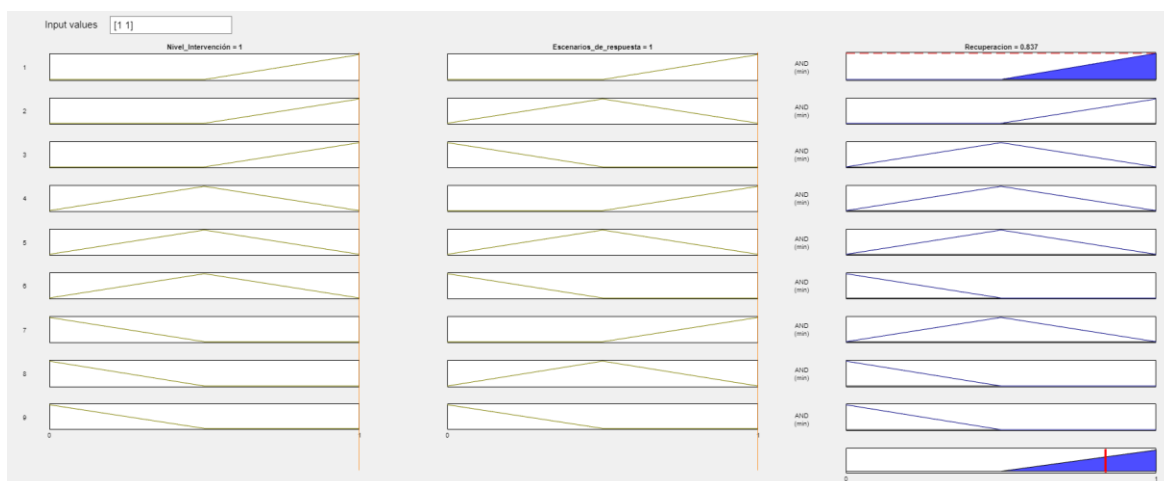
Fuente: Elaboración propia

De la inferencia para el parámetro de Capacidad de Gestión cuenta con un valor definido en la variable lingüística como Media, lo cual se debe a que si bien existe articulación entre las entidades locales para la gestión y atención de emergencias en la ciudad, el proyecto no cuenta con el Control y gestión requerido en obra, a esto debe sumarse que la caracterización económica del área se establece entre las más altas de acuerdo a los criterios definidos para evaluar dicha característica, aumentando las consecuencias a nivel económico en caso de daños por la materialización de un evento.

### 8.1.4 Recuperación

La evaluación de la recuperación en el tiempo previo al evento se determinará teniendo en cuenta que la excavación para los sótanos del edificio Green Office, se encontraba en ejecución, por tanto, las obras de recuperación corresponden a las mínimas afectaciones que puede tener una obra sin terminar. Estas corresponden a mejoramientos de andenes o sardineles afectados, arreglos menores en vías, correspondientes a daños por la circulación de maquinaria pesada al sitio de la obra. Bajo este escenario los tiempos de respuesta pueden ser de días y los escenarios de respuesta pueden estar dentro de la categoría I. Por lo tanto, la valoración del Nivel de Intervención y la Categoría de Respuesta en el tiempo t1 se estima en un valor de 1.

**Figura 8-14:** Inferencia del control difuso para la Recuperación en t1.



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8-4 se presentan las valoraciones para los criterios de Recuperación, y el resultado de la variable de salida, teniendo un valor de 0,84 de la inferencia difusa, la Recuperación se considera Alta.

**Tabla 8-4:** Valoración de criterios y parámetro de Recuperación en t1.

Criterio	Valor asignado	Recuperación en t1
Nivel de Intervención	1	0,84
Escenarios de Respuesta	1	

Fuente: Elaboración propia

## 8.2 Parámetros de resiliencia en t2

Los cuatro parámetros de resiliencia serán evaluados con las descripciones reportadas en los diferentes informes realizados por las instituciones que atendieron la emergencia y que constituyen los archivos del caso. También se acudió a fuentes informativa como periódicos en sus respectivas páginas web donde se escribe las acciones de mitigación y

recuperación además de los tiempos que tardo alcanzar las condiciones normales del área donde se presentó la emergencia por la falla de la excavación.

## 8.2.1 Robustez

### 8.2.1.1 Factor de seguridad y probabilidad de Falla

Para el tiempo posterior a la falla, debido a las condiciones encontradas principalmente en el interior de la excavación donde se reporta por parte del FOPAE daños a nivel estructural en las pantallas y columnas que conforman el sistema de contención de la excavación, se puede concluir que el sistema falló, en consecuencia, el factor de seguridad es menor que el equilibrio limite y la probabilidad es del 100%. En la **Fotografía 8-3** se puede evidenciar las condiciones encontradas en la obra después los hundimientos presentados en superficie, los cuales llevaron a la intervención por parte de las entidades distritales de gestión del riesgo.

**Fotografía 8-3:** Compromiso estructural de elementos de pantalla y columnas.



Fuente: DI-6041- FOPAE

En la Figura 8-15 se presenta la inferencia de los tres criterios evaluados para la robustez, después del evento de falla dadas las características encontradas.

**Figura 8-15:** Inferencia del control difuso para la Robustez en t2.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-5:** Valoración de criterios y parámetro de robustez en t2

Criterio	Valor asignado	Robustez t2
Factor de seguridad	0	0,16
Probabilidad de Falla	20	
Deformaciones en la excavación	40 cm	

Fuente: Elaboración propia

Se recuerda que la excavación desde la etapa de diseño no cumplió con las especificaciones mínimas establecidas en el código Colombiano Sismo Resistente de la época en que se proyectó el edificio Green Office (2008), y el cálculo de Robustez en el tiempo posterior al evento no se aleja del calculado en el tiempo t1, dando como resultado un sistema No Robusto.

### 8.2.2 Redundancia

**Nivel de servicio de las vías:** Según los reportes de EAAB, Alcaldía Local de Chapinero y el FOPAE, la Carrera 11 y Calle 98 tuvieron que ser cerradas debido al riesgo de colapso que presentaban debido a las deformaciones en superficie, esto quiere decir que el nivel de servicio de estas vías es nulo, por tanto, se da una calificación de 0 para la cuantificación de este parámetro de acuerdo con los criterios establecidos.



**Fotografía 8-4:** Estado de las vías después de la falla de la excavación.




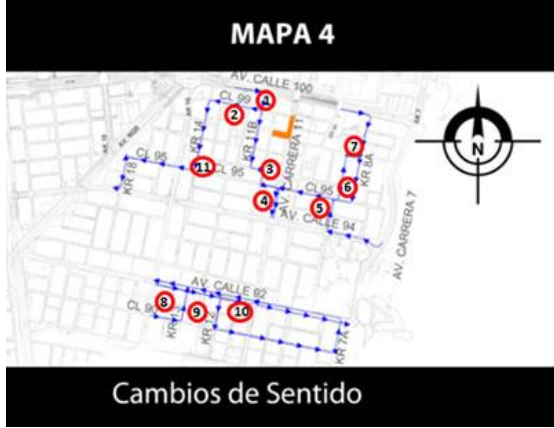
Fuente: Reportes FOPAE.

Adicionalmente según reportó el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, en su página de internet el sábado 7 de enero de 2012, debió al cierre de la Carrera 11 se desarrolló el “*Plan de Manejo de Tránsito Complementario por Emergencia Av. Carrera 11 Entre Calles 100 Y 92*”, que establece los desvíos por vías alternas de la siguiente forma:



**Tabla 8-6:** Desvíos del Plan de Manejo de Tránsito por Emergencia Carrera 11

Desvío	Características	Mapa
<p><b>Transporte Público (Sentido Occidente – Sur)</b></p>	<p>Los vehículos provenientes del Nor-Occidente de la Av. Carrera 19 –Av. Carrera 15 y Av. Calle 100 que tomaban la Av. Carrera 11 al Sur deberá continuar por esta última hasta la Av. Carrera 7 al sur – Calle 92 al Occidente – Av. Carrera 11 al sur en su recorrido habitual. (Véase Mapa 1).</p>	
<p><b>Transporte Público (sentido Oriente – Sur)</b></p>	<p>Los vehículos provenientes de la Av. Carrera 7 del Norte que tomaba la Av. Calle 100 al occidente y Av. Carrera 11 al Sur deberán continuar por la Av. Carrera 7 al sur – Calle 92 al Occidente – Av. Carrera 11 al sur en su recorrido habitual. (Véase Mapa 1).</p>	
<p><b>Transporte Particular (Sentido Occidente – Sur)</b></p>	<p>Vehículos que se desplazan por la Avenida Calle 100 del occidente y que tomaban la Avenida Carrera 11 al sur tendrán dos opciones así:  Avenida Calle 100 al Oriente – Carrera 8A al sur – Calle 95 al occidente y empalmar al sur por la Avenida Carrera 11 en su recorrido habitual (Véase Mapa 2). Carrera 11B al Sur – Calle 96 al oriente – Carrera 11 A al Sur – Calle 95 al Oriente y empalmar al sur por la Av. Carrera 11 en su recorrido habitual.</p>	
<p><b>Desvío Transporte Particular (Sentido Oriente – Sur)</b></p>	<p>Los vehículos provenientes de la Avenida Carrera 7 y que generalmente toman la Avenida Calle 100 hacia el occidente para continuar al sur por la Avenida Carrera 11, deberán realizar el siguiente desvío:  Continuar por la Avenida Carrera 7 al sur – Calle 94 al occidente – Carrera 9 al Norte – Calle 95 al Occidente y empalmar al sur por la Avenida Carrera 11 en su recorrido habitual.</p>	

Desvío	Características	Mapa
<p><b>Peatones y Ciclousuarios</b></p>	<p>De acuerdo con las recomendaciones dadas por el FOPAE el cierre contempla el paso peatonal al costado occidental y traslado del peatón al costado oriental de la Av. Carrera 11 y costado sur del parque localizado en la Calle 97 entre las Carreras 11 y 11 A (Véase Mapa 3).</p>	<p><b>MAPA 3</b></p>  <p><b>Desvío Peatones y Ciclousuarios</b></p>
<p><b>Nuevos Sentidos de circulación vehicular por Emergencia (Véase Mapa 4)</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Carrera 11 B entre la Av. Calle 100 y la Calle 99 (Operará en único sentido Norte – Sur)</li> <li>2. Calle 99 entre la Carrera 11B y la Carrera 14 (Operará en único sentido Oriente – Occidente)</li> <li>3. Carrera 11 A entre Calles 96 y 95 (Operará en único sentido Norte – Sur)</li> <li>4. Calle 95 entre la carrera 11 A y la Av. Carrera 11 (Operará en único sentido Occidente – Oriente)</li> <li>5. Carrera 9 entre la Calle 95 y la Calle 94 (Operará en único sentido Sur – Norte)</li> <li>6. Calle 95 entre la Carrera 8 A y la Carrera 9 (Operará en único sentido Oriente – Occidente)</li> <li>7. Calle 97 A entre la Carrera 8 A y la Carrera 9 (Operará en doble sentido de circulación)</li> </ol> <p>Calle 92 entre la Av. Carrera 11 y la Carrera 12 (Operará la calzada sur en único sentido Oriente – Occidente). En horario reversible operará de manera tradicional</p>	<p><b>MAPA 4</b></p>  <p><b>Cambios de Sentido</b></p>

Fuente: Elaboración propia basada en información del IDU (IDU, 2012)

**Redes de servicios:** Para el análisis de este criterio se usará información del documento “INFORME EMERGENCIA Kr. 11 x Cl. 98 EDIFICIO GREEN OFFICE CORPORATIVO. BARRIO CIUDAD CHICO NORTE II SECTOR - LOCALIDAD DE CHAPINERO DICIEMBRE 15 2011” hecho por la EAAB a raíz de las afectaciones a las redes de servicio de acueducto y alcantarillado que se encuentran cerca de la construcción.

En el informe se menciona que debido a los asentamientos de la edificación se han presentado agrietamientos y hundimientos en el suelo que afectaron las redes presentes las cuales son:

- Carrera 11 costado oriental: Red de 6" PVC.
- Carrera 11 costado occidental: Dos redes, una red de 6" PVC y otra red de 12 AC.

En la Figura 8-16 se puede ver la red de acueducto y alcantarillado en la zona, donde se señala las afectaciones del evento.

**Figura 8-16:** Identificación de redes de alcantarillado sanitario y pluvial.



Fuente: Reporte EAAB.

A estas redes se les realizó un monitoreo por medio de pitometrias e inspección visual, las cuales no detectaron fugas, sin embargo dadas las condiciones del entorno se decide suspender el servicio de la red de 6" y 12" del costado occidental para la instalación de válvulas que garanticen el control del suministro de agua en caso de llegarse a presentar fugas. La EAAB realiza la instalación de 2 tapones en la carrera 11 a la altura de la calle 100, cambia válvula de 3" en la carrera 11A con calle 99, sobre la carrera 11 a la altura de la calle 98, finalizando el parque, instala válvula de 12" y otra de 6". En la **Figura 8-17** se muestran los trabajos mencionados.

**Figura 8-17:** Trabajos realizados para el control de suministro de agua.



Fuente: Reporte EAAB.

Por otra parte, en el informe de la Universidad Nacional, se indica que el 29 de septiembre se presenta el primer reporte de falla en servicio de acueducto por parte de un usuario y el 30 de septiembre el gerente del proyecto Green Office solicita al acueducto la revisión de redes de alcantarillado ya que según informa “*existen filtraciones de varios meses e indica que a la fecha desde hacía dos meses no se registraban lluvias en el sector*”.

Con base en lo anterior, se puede establecer, que, si bien en las inspecciones realizadas por la EAAB no se encontraron afectaciones graves a la red de servicio de acueducto y alcantarillado, esta empresa tuvo que realizar trabajos que obligaron a suspender el servicio durante 5 días. En la cuantificación de este criterio se asigna un valor de 0,7.

**Deformaciones en el entorno:** Las deformaciones en el entorno pueden ser comprobadas en los Diagnostico Técnicos por medio de inspección visual hechos por el FOPAE, donde se registran deformaciones después del mes de octubre de 2011 donde se presentaron hundimientos sobre la carrera 11 entre calles 98 y 99 que fueron progresando hasta el mes de diciembre de 2011. Estas deformaciones deterioraron las condiciones originales debido a la activación del movimiento relacionado con el desconfinamiento del suelo producto de la excavación de los tres sótanos del edificio Green Office. Como resultado se presenta un hundimiento en la parte superior, levantamientos del fondo de la excavación, fisuras en las estructuras y agrietamientos del suelo, vías y pavimentos.

Para el sector del parque de la calle 98 se puede ver en siguiente fotografía que el proceso de falla llevo al hundimiento y colapso del gran parte del parque, generó asentamientos diferenciales en el costado suroriental de la edificación. En el inclinómetro I03 instalado en el sector del parque, la Universidad Nacional registró desplazamientos posteriores al colapso del terreno del orden de 30mm.

**Fotografía 8-5:** Estado del parque sobre la Calle 98.

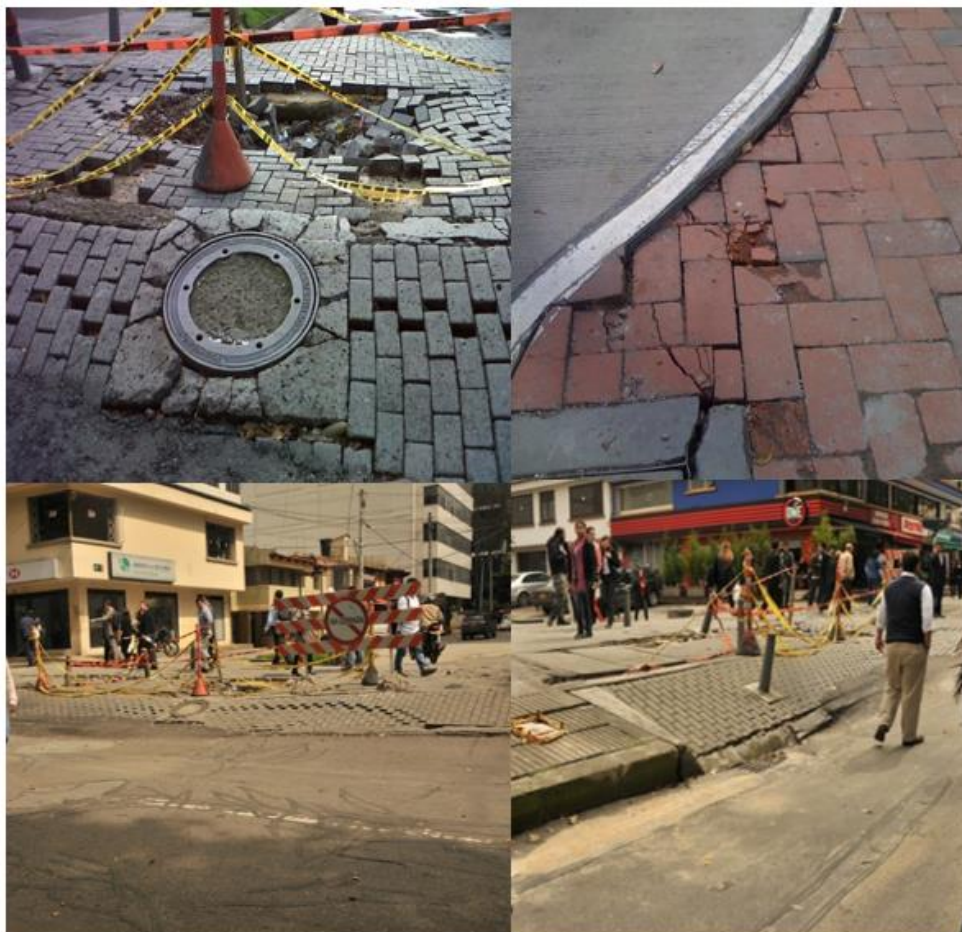


Fuente: Reportes FOPAE y EAAB.

Según el estudio de la Universidad Nacional “Los movimientos ocurridos en el sector de la carrera 11 se registraron mediante instrumentación tipo inclinómetros (I01, I02) que mostraron desplazamientos acumulados de hasta 15mm (registros 4 de abril de 2012) y velocidades del orden de 5mm/hora durante la simulación de tránsito del día 14 de febrero de 2012”. En las siguientes imágenes se puede evidenciar las condiciones en las que se encontraba el entorno después del evento de falla en los sótanos del edificio Green Office.



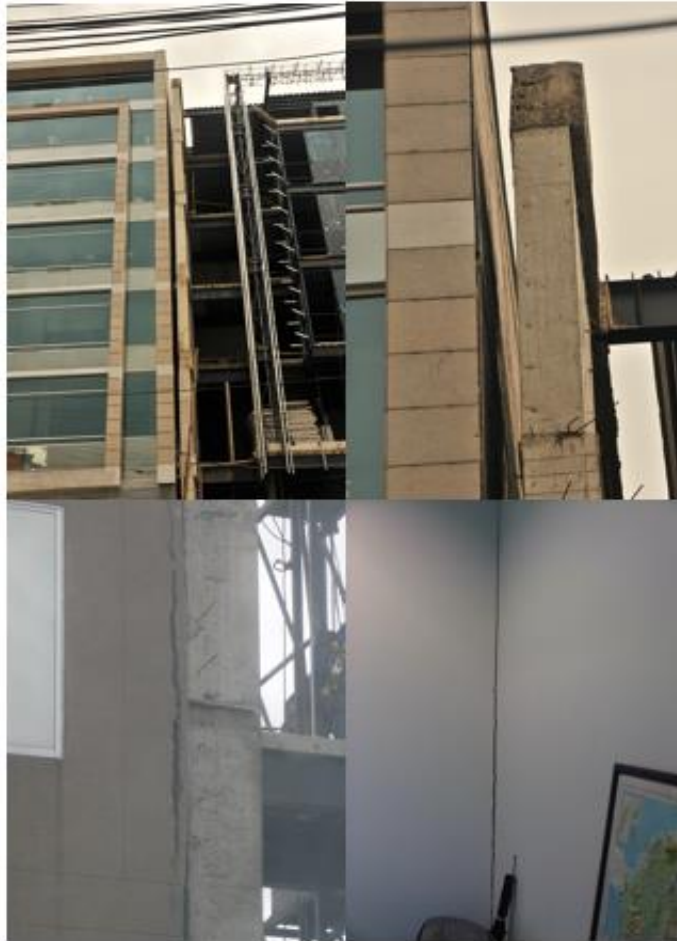
**Fotografía 8-6:** Estado de los andes paralelos a la Carrera 11.



Fuente: EAAB 2012

La edificación contigua a la construcción también se vio afectada por las deformaciones ocasionadas, en la fachada se presentaron agrietamientos y fisuras las cuales se pueden ver en la fotografía 9-7.

**Fotografía 8-7:** Afectaciones a la edificación continua a la construcción.



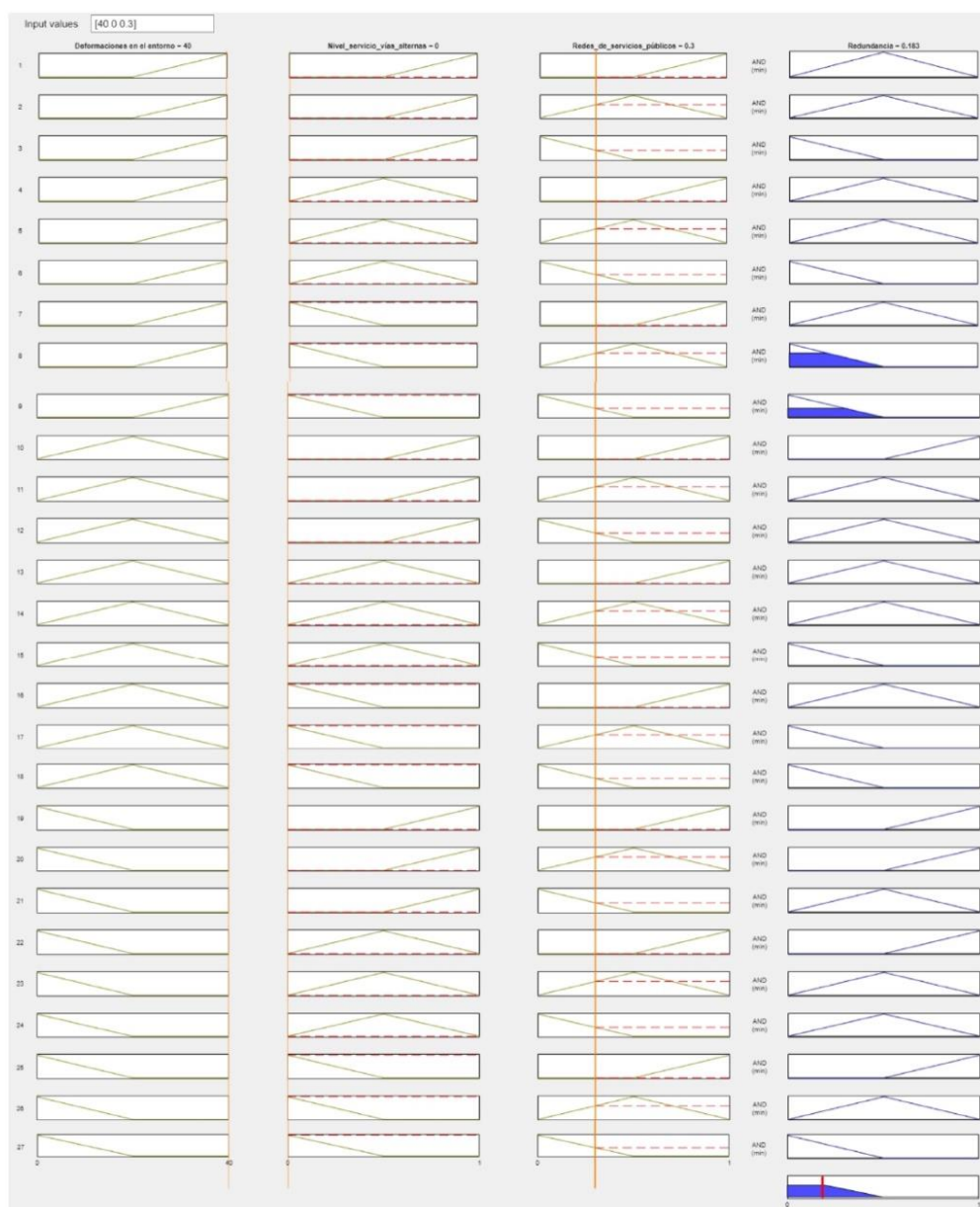
Fuente: Reporte FOPAE.

De lo anterior, las afectaciones más importantes que tuvo el entorno de la edificación fueron los presentados en el hundimiento y colapso del parque de la Calle 98, donde el FOPAE cerró y restringió el flujo peatonal.

Por lo anterior, la calificación por el criterio de deformaciones en el entorno es de 40 ya que como se acaba de mostrar las deformaciones superan el valor de 40 cm para la zona del parque.

Después de la evaluación de todos los criterios adoptados para el parámetro de Redundancia luego de la falla en el edificio Green Office consolidados en la Tabla 8-7, se puede determinar que la Redundancia en t2 es de 0,18 que corresponde a la calificación de la variable lingüística No Redundante, teniendo así una baja en la calificación en comparación a la del momento previo al evento.

**Figura 8-18:** Inferencia del control difuso para la Redundancia en t2.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-7:** Valores asignados a los criterios para la Redundancia en t2.

Criterio	Valor asignado	Redundancia en t2
Nivel de Servicio de las Vías	0	0,18
Redes de Servicios	0,3	
Deformaciones en el entorno	40	

Fuente: Elaboración propia

### 8.2.3 Capacidad de gestión

**Control y Monitoreo Geotécnico:** Para determinar el criterio de Control y Monitoreo, se revisan las condiciones de este después del evento. A primera vista el proyecto contaba con la planificación de un monitoreo geotécnico suficiente para medir la estabilidad de las obras y detectar las anomalías que se desarrollaran durante construcción, sin embargo, en las bitácoras de obra no se evidencia la instalación de estos elementos. Adicionalmente de acuerdo con las afectaciones evidenciadas y la existencia de la falla, se puede inferir que no se realizó un control del deterioro de las condiciones originales de todo el sistema ni se previó la activación del movimiento en las secciones analizadas.

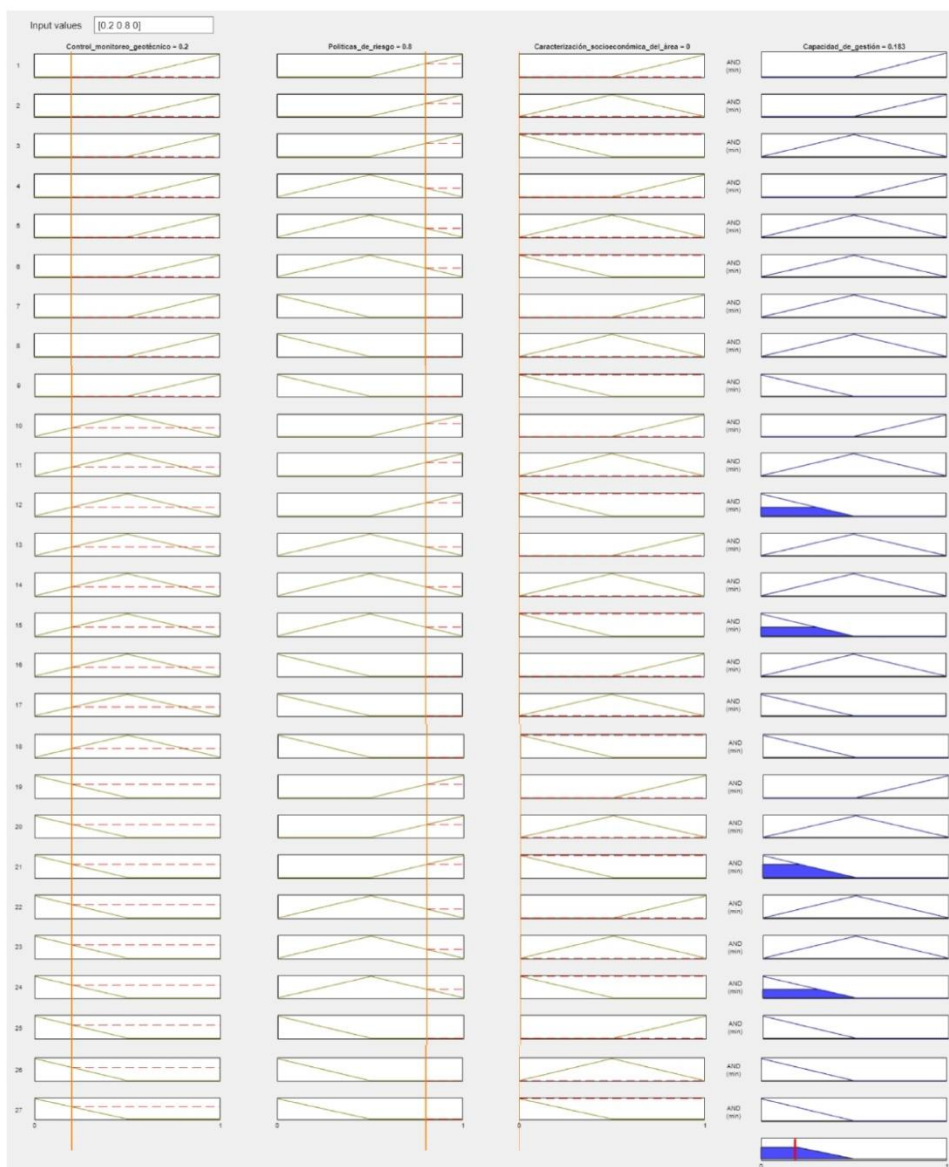
Desde el 21 de julio de 2009 se presentaron los primeros inconvenientes en la excavación, según se reporta en la bitácora ese día se presenta un primer derrumbe por dejar la excavación abierta por más tiempo del debido. El 04 de noviembre de 2010 se informa que se observó “barriga” en la pantalla del edificio vecino, sin embargo, no se indica que se hicieron mediciones en el monitoreo, tampoco existen comentarios en bitácora que indiquen en que fechas fueron instalados los instrumentos ni el cómo se superaron los primeros indicios de movimientos.

En los archivos se encontró que se hizo un informe de monitoreo el 8 de febrero de 2012, es decir, previo a la falla. En dicho informe no se establecen medidas de contingencia

frente a lo ocurrido, ni la comparativa de los resultados con monitoreos anteriores. Dado lo anterior, al criterio Control y Monitoreo se asigna un valor de 0,2.

Igualmente, para el t1 se usa el sistema difuso con los valores definidos de cada criterio para el parámetro Capacidad de gestión. En la **Tabla 8-8**, se resume los valores de cada criterio en el tiempo 2.

**Figura 8-19:** Inferencia del control difuso para la Capacidad de gestión en t2.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-8:** Valoración de criterios y parámetro Capacidad de Gestión t2.

Criterio	Valor asignado	Capacidad de gestión en t2
Control y Monitoreo Geotécnico	0,2	0,18
Políticas de gestión frente al riesgo	0,8	
Caracterización socioeconómica	0	

Fuente: Elaboración propia

Comparando el valor de Capacidad de Gestión en t1, se encuentra que, debido a la falta de un control y monitoreo de la obra, la Capacidad de Gestión del sistema en t2 bajo de manera considerable, calificado en el rango de Capacidad Baja.

### 8.2.4 Recuperación

Con base en todos los criterios desarrollados en este documento, la recuperación en el tiempo después del evento es el que más influencia tiene en el cálculo de la capacidad de resiliencia, debido a que tiene en cuenta las acciones llevadas a cabo después de presentarse el evento.

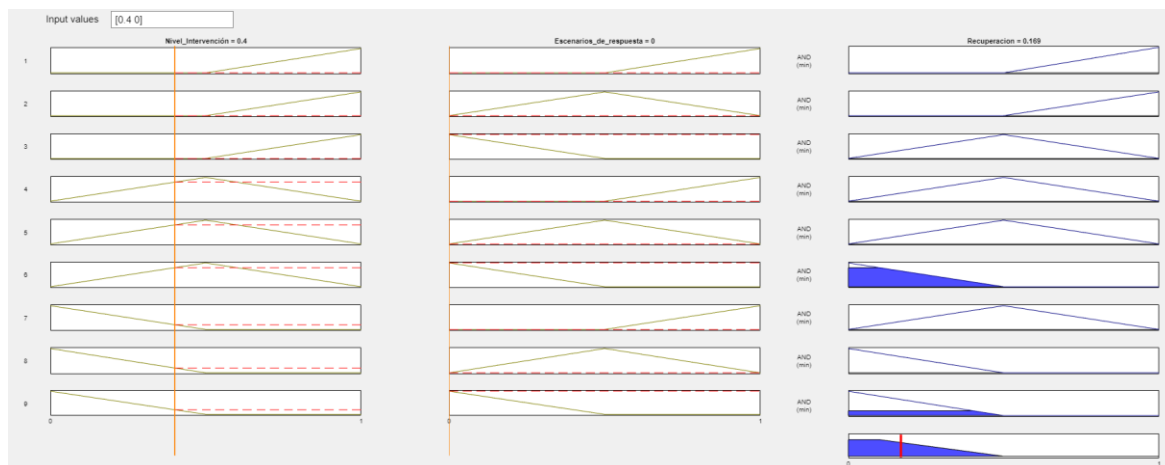
Después de una revisión detallada de archivos del caso y noticias sobre el mismo, relacionadas con las acciones para recuperar la funcionalidad del sistema, se encontró que: El del 21 de diciembre la constructora Pijao inició la construcción de las obras de “mitigación” que correspondían a una pantalla nueva frente a la ejecutada anteriormente la cual fallo y se fracturó. Adicional a la pantalla se realizó un relleno fluido en la zona del parque, específicamente donde se presentó el hundimiento. De aquí se infiere que las obras de mitigación corresponden a obras de reparación de los elementos dañados alrededor de la obra y de reconstrucción al interior de la obra de excavación.

En cuanto a la categoría de respuesta, según información registrada en el portal de noticias La República, las obras de mitigación tuvieron una duración de 35 días, 10 días antes de lo acordado con las entidades locales.

Respecto a la apertura de la vía de la carrera 11, el portal Confidencial de Noticias, menciona que esta duro cerrada por un periodo de 11 meses, iniciando el cierre el 12 de diciembre debido a los hundimientos ocasionados al costado oriental y occidental de la vía, hasta el 22 de agosto de 2012.

Dadas las intervenciones realizadas para recuperar la funcionalidad de la excavación y los elementos circundantes afectados, la valoración para el criterio de nivel de intervención posterior al evento se determina en 0,4; ya que se tiene obras de reconstrucción realizadas al interior de la obra, y otras de reparación en el espacio público afectado. Para la categoría de respuesta, se determina que está dentro de la categoría 3, ya que, si bien las obras de mitigación tardaron un periodo de 35 días, la vía tomo alrededor de un año para volver a su nivel de servicio normal, por tanto, la valoración de dicha categoría es de 0.

**Figura 8-20:** Inferencia del control difuso para la Recuperación en t2.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-9:** Valoración de criterios y parámetro de Recuperación t2.

Criterio	Valor asignado	Recuperación en t2
Nivel de Intervención	0,4	0,17
Escenarios de respuesta	0	

Fuente: Elaboración propia

De manera similar al parámetro de Capacidad de Gestión, la Recuperación del sistema bajo significativamente en la evaluación en el tiempo  $t_2$ , llegando a la categoría de la variable lingüística de Recuperación Baja. Esto debido a que el nivel de intervención requerido en el área no solo se tenía categoría entre Recuperación y Reconstrucción, también tomo más tiempo llegar al nivel de funcionalidad inicial del sistema analizado, teniendo así el escenario de respuesta más desfavorable.

## 9. Cálculo de Resiliencia

Para el cálculo de la resiliencia se ha decidido adoptar la aplicación de un operador de agregación tipo Promedio Ponderado Ordenado (OWA) que permite obtener un vector de pesos para la agregación de acuerdo con la actitud del evaluador. Como el vector de pesos determina la forma en que el operador OWA agrega la información, es posible aplicar la actitud por medio de una variable  $\alpha$  denominada Orness que simula dos valores extremos  $\alpha=1$  para establecer una actitud optimista y  $\alpha=0$  para una actitud pesimista, para evaluar actitudes intermedias La Orness tomara valores  $\alpha$   $[0, 0.5]$  y entre  $\alpha$   $[0.5, 1]$  (O. Duarte & Téllez, 2018b).

Esta aplicación se considera importante al momento de evaluar la resiliencia de un sistema, pues permite reflejar la actitud frente al riesgo que tenga el evaluador, la cual está dada por la cantidad de riesgo que puede o quiere asumir. Una actitud pesimista considera que el riesgo es alto, y por lo tanto es pertinente revisar todas las posibles fallas que pueda tener el sistema para así encaminar las acciones que conlleven a eliminar o mitigar los efectos. La actitud optimista por su parte considera que el riesgo del sistema frente a las amenazas no es tan grande y se puede gestionar con medidas menos trascendentales y por ende más económicas (referencia de lógica difusa en la medición de riesgo).



Con los valores calculados de los parámetros robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación en el tiempo previo al evento (t1) y posterior (t2) presentados en resumen en la Tabla 9-1, a continuación, se presenta la evaluación de la Resiliencia en los tiempos correspondientes, usando el operador de Agregación OWA anteriormente descrito.

**Tabla 9-1:** Resumen de los valores de los parámetros de Resiliencia

ANTES DEL EVENTO						
Parámetro de resiliencia	ENTRADA			SALIDA		
	Variable lingüística	Valor en sistema difuso	Términos lingüísticos	Variable lingüística	Valor de Salida	Términos lingüísticos correspondiente
Robustez	Factor de seguridad	0,74	Inestable	Robustez	0,173	No Robusto
	Probabilidad de falla	20	Falla			
	Desplazamientos en la excavación	20	Severidad Media			
Redundancia	Nivel de servicio de las vías	0,7	C y D	Redundancia	0,54	Medianamente Redundante
	Redes de servicios públicos	0,7	Secundarias			
	Deformaciones en el entorno	5	Severidad Baja			
Capacidad de gestión	Control y monitoreo geotécnico	0,7	Alto	Capacidad de Gestión	0,409	Media
	Políticas de riesgos	0,8	Alto			
	Caracterización socioeconómica del área	0	Alto			
Recuperación	Nivel de intervención	1	Mejoramiento	Recuperación	0,837	Alta
	Escenarios de respuesta	1	Categoría I			
DESPUES DEL EVENTO						
Parámetro de resiliencia	ENTRADA			SALIDA		
	Variable lingüística	Valor en sistema difuso	Términos lingüísticos	Variable lingüística	Valor de Salida	Términos lingüísticos correspondiente
Robustez	Factor de seguridad	0	Inestable	Robustez	0,163	No Robusto
	Probabilidad de falla	20	Falla			
	Desplazamientos en la excavación	40	Severidad Alta			
Redundancia	Nivel de servicio de las vías	0	E y F	Redundancia	0,183	No Redundante
	Redes de servicios públicos	0,3	Secundarias			
	Deformaciones en el entorno	40	Severidad Alta			
Capacidad de gestión	Control y monitoreo geotécnico	0,2	Bajo	Capacidad de Gestión	0,183	Baja
	Políticas de riesgos	0,8	Alto			

	Caracterización socioeconómica del área	0	Alto			
Recuperación	Nivel de intervención	0,3	Reconstrucción	Recuperación	0,169	Baja
	Escenarios de respuesta	0	Categoría III			

Fuente: Elaboración propia

Para los valores calculados en el control difuso se aplica ahora el operador de agregación OWA con todos los valores de Ornes entre 0 y 1 (Ver Tabla 9-2), con el fin de establecer la curva de Resiliencia de la excavación, mostrando las franjas de actitud optimista, pesimista y una franja que se considera de actitud neutra tal como se presenta en la Figura 9-1.

**Tabla 9-2:** Cálculo de Resiliencia para Ornes entre 0 y 1 previo al evento

Parámetro de Resiliencia	t1				Resiliencia
	Recuperación	Redundancia	Capacidad de Gestión	Robustez	
Orness	W1	W2	W3	W4	
0	0,00	0,00	0,00	0,17	0,17
0,1	0,02	0,07	0,01	0,14	0,25
0,2	0,04	0,13	0,03	0,11	0,31
0,3	0,05	0,17	0,05	0,09	0,36
0,4	0,05	0,19	0,09	0,07	0,39
0,5	0,21	0,14	0,10	0,04	0,49
0,6	0,32	0,11	0,14	0,01	0,58
0,7	0,41	0,07	0,13	0,01	0,63
0,8	0,54	0,04	0,10	0,01	0,68
0,9	0,68	0,02	0,06	0,00	0,75
1	0,837	0	0	0	0,837

Fuente: Elaboración propia

**Figura 9-1:** Resiliencia del sistema previo al evento para Ornes entre 0 y 1.

Se puede comprobar que con el aumento de la Ornes, el valor de resiliencia del sistema incrementa aun cuando se tiene los mismos valores de robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación, de modo que si el evaluador o tomador de decisiones elige una actitud optimista tendrá valores de resiliencia entre 0,58 y 0,84, mientras que para la actitud pesimista los valores de resiliencia estarán entre 0,17 y 0,39, para el sistema de excavación en el momento previo al evento disruptivo.

Ahora se presentan los resultados del cálculo para la Resiliencia en el tiempo t2.

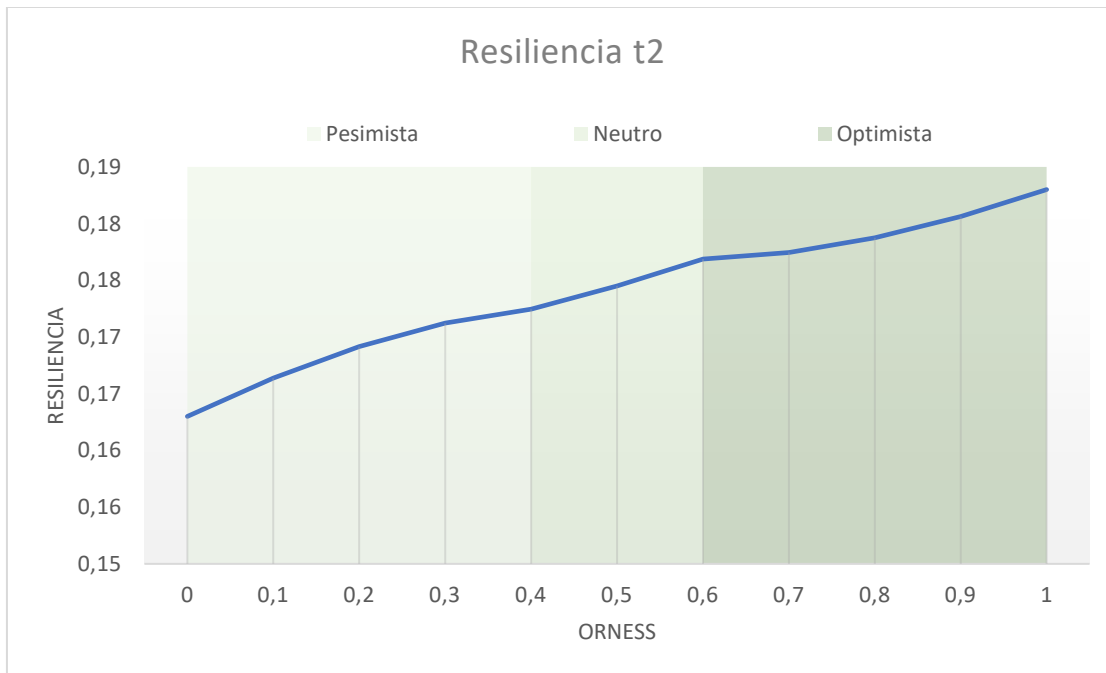
**Tabla 9-3:** Calculo de Resiliencia para Orness entre 0 y 1 después del evento

Parámetro de resiliencia	t2				Resiliencia
	Redundancia	Capacidad de Gestión	Recuperación	Robustez	
	0,18	0,18	0,17	0,16	
Orness	W1	W2	W3	W4	
0	0,00	0,00	0,00	0,16	0,16
0,1	0,00	0,02	0,01	0,13	0,17
0,2	0,01	0,04	0,01	0,10	0,17
0,3	0,01	0,06	0,02	0,08	0,17

Parámetro de resiliencia	t2				Resiliencia
	Redundancia	Capacidad de Gestión	Recuperación	Robustez	
	0,18	0,18	0,17	0,16	
Orness	W1	W2	W3	W4	
0,4	0,01	0,06	0,04	0,06	0,17
0,5	0,05	0,05	0,04	0,04	0,17
0,6	0,07	0,04	0,06	0,01	0,18
0,7	0,09	0,02	0,05	0,01	0,18
0,8	0,12	0,01	0,04	0,01	0,18
0,9	0,15	0,01	0,02	0,00	0,18
1	0,18	0,00	0,00	0,00	0,18

Fuente: Elaboración propia

**Figura 9-2:** Resiliencia del sistema posterior al evento para Ornes entre 0 y 1.

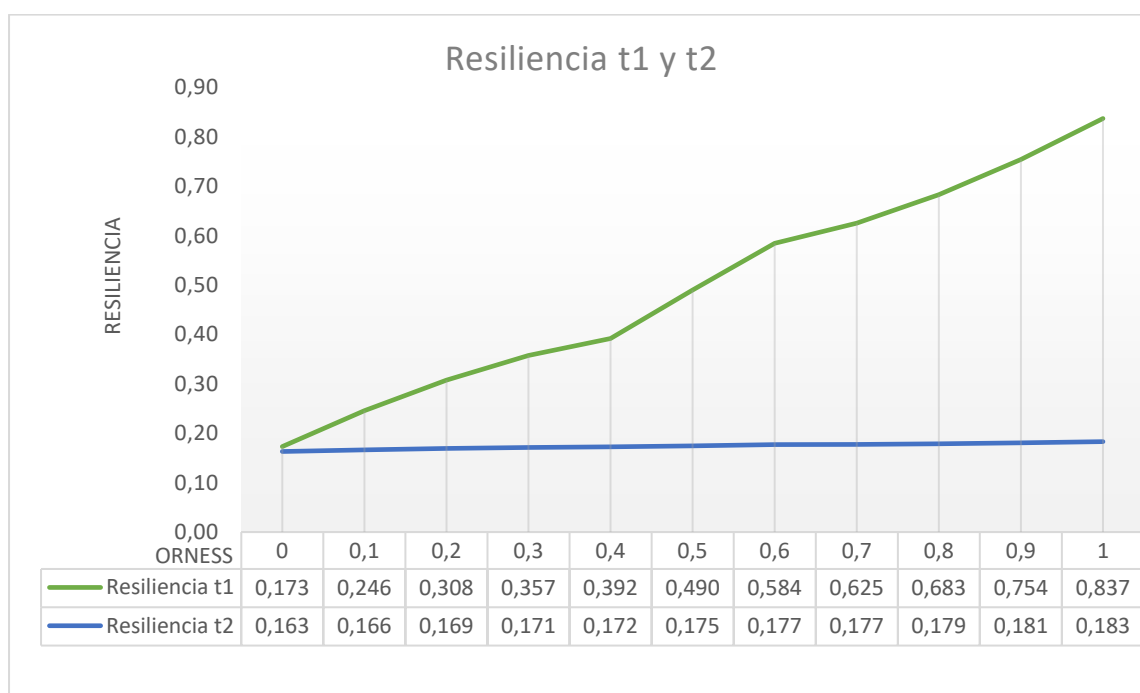


En el momento previo los valores de Resiliencia del sistema de excavación no presentan variaciones significativas entre los valores obtenidos para una actitud pesimista, y los obtenidos para el lado optimista, pues se encuentran variando entre 0,16 y 0,17 y desde 0,17 y 0,18 respectivamente. Esto se debe a que los parámetros de resiliencia estaban

muy por debajo de los niveles aceptables, incluso los de capacidad de gestión y recuperación, que son claves en las repuestas del sistema después del evento y se puede decir que tienen mayor relevancia en el cálculo (Jazmin Natalia Pedreros Alba Nancy Viviana Roncancio Cabrejo, 2022a; Sungay et al., 2012b).

Para hacer una evaluación más detallada de los resultados, a continuación, se presenta en la Figura 9-3 el comparativo de los valores para los dos tiempos establecidos en el análisis.

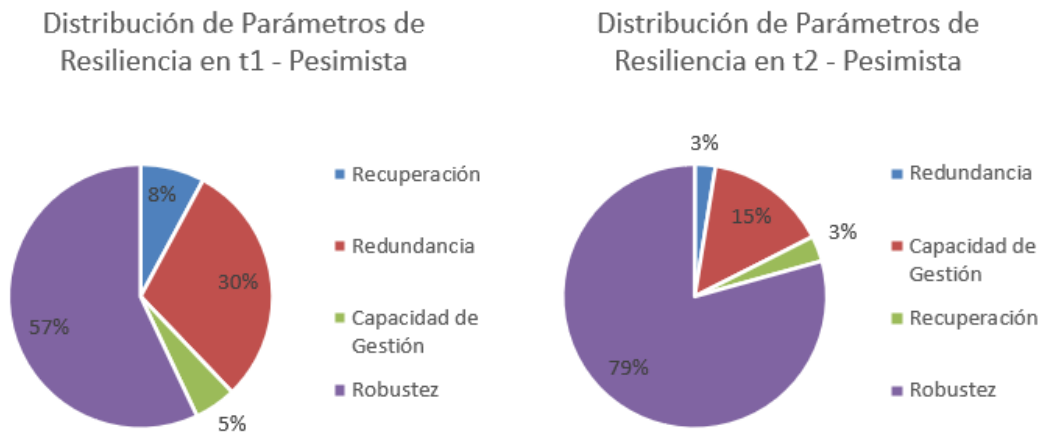
**Figura 9-3:** Comparativa de Resiliencia en t1 y t2.



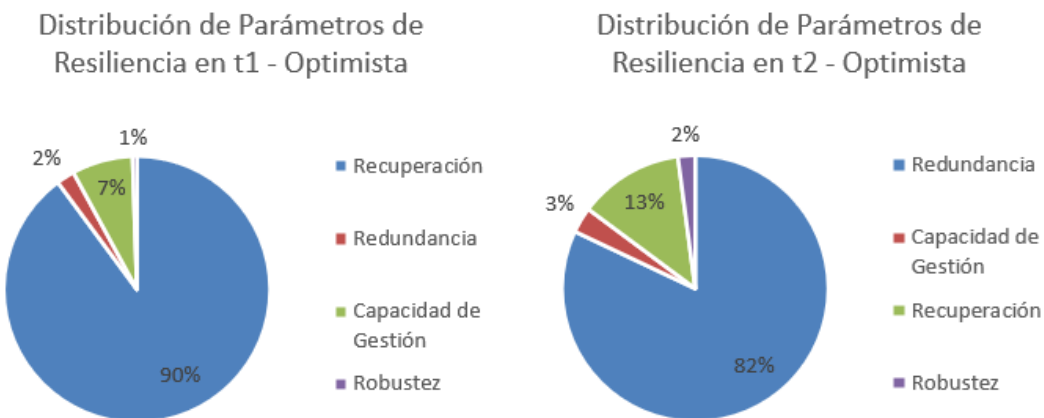
La grafica permite evidenciar que en efecto la Resiliencia del sistema no presenta variaciones en el momento previo al evento, ni para la actitud optimista, ni para la pesista, demostrando que el sistema de excavación y su entorno tuvieron una perdida significativa de Resiliencia después de materializado el evento de falla de la excavación, especialmente para la actitud optimista. De los anterior es posible concluir que, en este caso específico, la actitud pesimista es más acertada dadas las condiciones del sistema de excavación y pudo ser una evaluación pertinente para el proyecto evidenciando las falencias de este para encontrar las mejoras necesarias.

Ahora, con el fin de identificar el parámetro que aporta a la Resiliencia en cada uno de los tiempos definidos, se grafican los resultados en un diagrama sectorial o de torta que permite ver la magnitud en porcentaje de cada uno de los parámetros. Teniendo en cuenta que también se está calculando la Resiliencia de acuerdo con la actitud del evaluador, las gráficas mostradas en la Figura 9-4 y Figura 9-5 se realizaron con valores de Orness  $\alpha=0,1$  y  $0,9$ ; haciendo una revisión adicional de los valores de la actitud neutra con  $\alpha=0,5$ .

**Figura 9-4:** Distribución de parámetros de resiliencia en t1 y t2 – actitud pesimista



**Figura 9-5:** Distribución de parámetros de resiliencia en t1 y t2 – actitud optimista



---

Es necesario recordar la teoría con la que el operador OWA realiza la agregación, el primer paso consiste en ordenar de mayor a menor los valores a agregar y de acuerdo con el valor de Orness escogida, genera el vector de pesos, entonces si la actitud es pesimista ( $\alpha$  entre 0 y 0,4), el operador asigna el mayor peso (del vector de pesos  $W$ ) al menor valor de los parámetro a agregar, de la misma forma que para la actitud optimista ( $\alpha$  entre 0,6 y 1), el operador OWA asigna el mayor peso del vector  $W$  al mayor valor de los parámetros.

En consecuencia, para una actitud pesimista el parámetro de robustez se considera como el parámetro de mayor peso, esto quiere decir que es el parámetro al cual se debe prestar mayor atención, porque no aporta a la Resiliencia y hace que el sistema sea menos Resiliente. En este caso de estudio se tiene que la robustez presenta valores similares tanto para el tiempo previo al evento, como al momento posterior, pues desde la fase de diseño se ve una baja calificación de los criterios que componen la robustez, lo que infiere que el sistema de contención para la excavación no contaba con un diseño adecuado que permitiera al sistema resistir o minimizar los efectos de un evento de falla.

Bajo la evaluación desde una perspectiva optimista en el momento previo, la recuperación es la que aporta a la resiliencia del sistema con un 90% del valor total, esto significa que si el sistema mantiene las características de los criterios definidos para la recuperación en cuanto al nivel de intervención y escenarios de respuesta, es la recuperación la que hará el sistema Resiliente, cabe aclarar que esta es la distribución de parámetros del caso de estudio, donde desafortunadamente se tienen valores muy bajos de robustez.

En el caso optimista, vemos que para el tiempo posterior al evento es la redundancia la que aporta al total del valor de Resiliencia con un 80% en este caso específico, lo cual indica que después del evento el sistema perdió las características de recuperación y es la redundancia la de mayor aporte presenta en la Resiliencia del sistema.

En conclusión, la aplicación del operador OWA permite gestionar desde un punto de vista neutral, optimista y pesimista las principales características de la Resiliencia, facilitando la toma de decisiones frente al riesgo que quiera o pueda asumir una entidad y/o persona dependiendo de los recursos disponibles.

## 9.1 Índice de resiliencia

Finalmente se calcula el índice de resiliencia aplicando la ecuación 4.1, a los cálculos mostrados anteriormente, que están enmarcado por la actitud del evaluador, para la actitud pesimista los índices de resiliencia de la excavación se encuentran entre 1,06 y 2,27 y para la actitud optimista, los valores oscilan entre 3,30 y 4,57. Los valores calculados se encuentran en la Tabla 9-4.

**Tabla 9-4:** Índice de Resiliencia del sistema de excavación

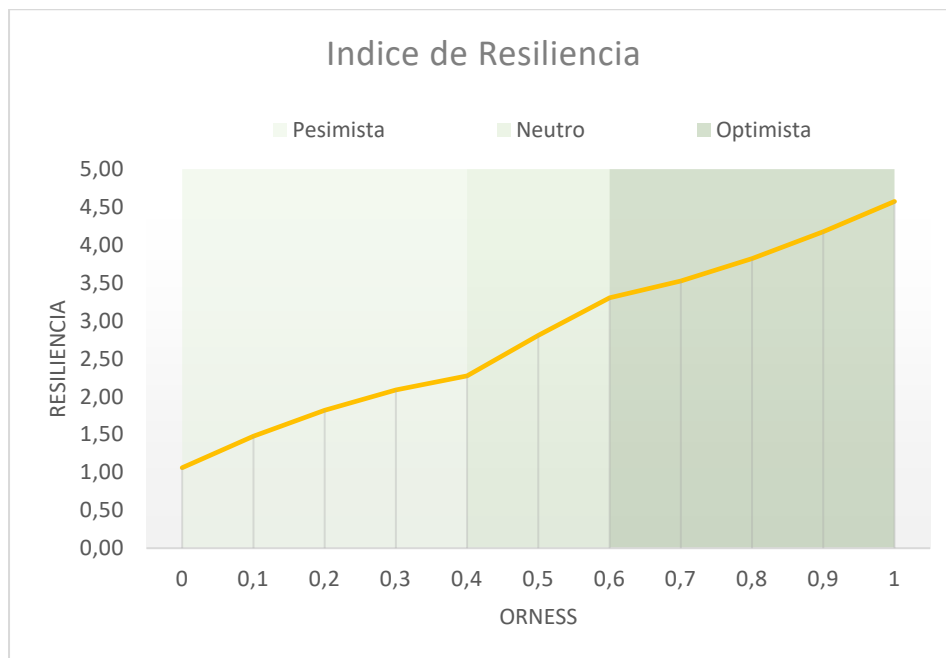
Actitud	Orness	Resiliencia t1	Resiliencia t2	Índice de Resiliencia
Pesimista	0	0,173	0,163	1,06
	0,1	0,246	0,166	1,48
	0,2	0,308	0,169	1,82
	0,3	0,357	0,171	2,09
	0,4	0,392	0,172	2,27
Neutro	0,5	0,490	0,175	2,81
Optimista	0,6	0,584	0,177	3,30
	0,7	0,625	0,177	3,52
	0,8	0,683	0,179	3,82
	0,9	0,754	0,181	4,18
	1	0,837	0,183	4,57

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento del índice de Resiliencia, permite evidenciar que el sistema presento una perdida fuerte de Resiliencia después de ocurrido el evento de falla, pues los valores de resiliencia en t2 son inferiores a los de t1, dando como resultado de la relación  $R(t1)/R(t2)$  valores mayores a 1.



**Figura 9-6:** Índice de resiliencia del sistema de excavación.



El índice refleja que para una actitud pesimista la Resiliencia en el tiempo t1 y el t2 no representan una variación significativa, esto es debido a que como se presentó en el capítulo 8.1.1 el parámetro de robustez resultó ser muy bajo afectando la resiliencia del sistema de excavación desde el inicio.

## 9.2 Función de desempeño

Con base en las definiciones de la función de desempeño que busca determinar el comportamiento del sistema en momentos diferentes en la línea de tiempo y la de Resiliencia, que se describe como la capacidad de recuperar el nivel de desempeño del sistema analizado después de un evento disruptivo, en este trabajo se propone establecer la función de desempeño, de acuerdo con los cálculos de Resiliencia hechos para el caso de estudio.

Por tanto, la función de desempeño propuesta para el sistema de excavación corresponde a los valores de la Resiliencia en los diferentes tiempos evaluados y que se constituyen en

dos medidas temporales del mismo sistema, en concordancia, la función se presenta como la integral de la resiliencia evaluada en dos tiempos, y se presenta como:

$$FD = \int_{t1}^{t2} R(t) \quad (9.1)$$

$$FD = R(t2) - R(t1) \quad (9.2)$$

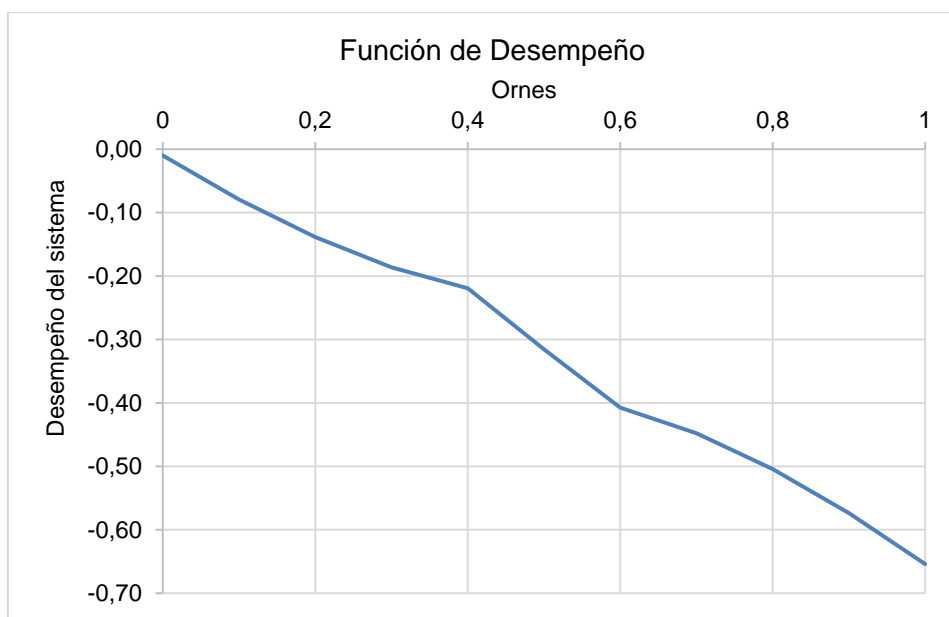
Donde t1: Es el tiempo antes del evento

t2: Es el tiempo posterior al evento

R(t): Es el valor de resiliencia evaluado en los tiempos previstos.

Si la función de desempeño de la excavación está dada por la ecuación 9.1 el desempeño de la excavación tendrá un comportamiento descendente, representando así los resultados del caso de estudio donde se logró comprobar que el sistema compuesto por la excavación y su entorno presento una pérdida importante de resiliencia después del evento disruptivo, comprometiendo su desempeño y la funcionalidad. De los resultados de la Tabla 9-4 se calcula la función de desempeño que se presentan en la Figura 9-7.

**Figura 9-7:** Función de desempeño del sistema de excavación.



La grafica presenta el mismo comportamiento descendente para todas las actitudes representadas por la Orness, lo cual es consistente con los resultados y análisis de la excavación.

## **10. Conclusiones y recomendaciones**

### **10.1 Conclusiones**

Los criterios usados corresponden específicamente una excavación en un entorno urbano, donde es importante identificar los elementos que la componen, no solo a nivel estructural o dimensiones, también es necesario reconocer algunos elementos del entorno que podrían verse afectados en caso de una falla, con el fin de establecer las amenazas del sistema y distinguir claramente los afectos adversos debido a una interrupción de su funcionamiento.

Para el planteamiento de los criterios de robustez fue necesario ampliar las características de la falla en los estados límite de servicio y el estado limite último, que terminaron afectando el funcionamiento de la estructura en construcción y sus alrededores, haciendo llegar a la parálisis. Por tanto, se consideran que los análisis geotécnicos de equilibrio limite y deformaciones permiten identificar la capacidad de absorción de la excavación.

Respeto a los parámetros resilientes, en la robustez es de gran importancia la configuración geométrica de los elementos de contención y el sistema constructivo ya que como se presentó en el numeral 6, si dicha configuración no es adecuada el suelo puede

presentar desconfinamiento y en consecuencia podría ocasionar sobrepresiones que derivan en desplazamientos que no puedan ser compensados con la superestructura.

En la redundancia se consideran que los elementos con mayor afectación son las redes, siendo esta infraestructura crítica en la propagación del evento en caso de darse. Por lo tanto, se incluyeron al igual que las vías para con ello evaluar no solo la excavación, también los componentes de un sistema de infraestructura crítica.

Cuando una excavación falla, la robustez se refiere a la capacidad de resistencia y estabilidad de la estructura excavada ante dicho fallo. La falta de robustez en una excavación puede conducir a colapsos, deslizamientos de tierra u otros problemas graves que pueden poner en peligro la seguridad de los trabajadores y la estabilidad de las estructuras cercanas.

De los resultados obtenidos aplicando la metodología al sistema de excavación se puede concluir que la resiliencia depende de varios factores, entre ellos:

**Diseño adecuado:** Un diseño adecuado de la excavación es fundamental para garantizar la robustez, permitiendo aumentar la capacidad del sistema de resistir un evento. Esto implica considerar las cargas aplicadas, las características del suelo, las condiciones geotécnicas y los elementos de soporte. Los diseños deben tener los análisis geotécnicos detallados tanto de estabilidad como de deformaciones que permitan identificar los factores a mejorar, esto no implica una estructura completamente robusta, pero baja los riesgos de amplificar los efectos adversos.

**Selección de técnicas de soporte adecuadas:** Las técnicas de soporte, como la instalación de muros de contención, pilotes o anclajes, son esenciales para mantener la estabilidad de la excavación. La elección de las técnicas de soporte adecuadas depende de las condiciones específicas del sitio y del tipo de suelo, logrando evitar que los efectos de una falla se trasladen al entorno.

Supervisión y control continuo: La supervisión constante durante el proceso de excavación es esencial para identificar cualquier signo de debilidad o falla inminente. El monitoreo geotécnico y estructural puede proporcionar información crucial sobre la estabilidad de la excavación y permitir la toma de medidas correctivas a tiempo, aumentando la capacidad de gestión desde adentro de la obra, y por consiguiente el nivel de reacción.

Acciones de Mantenimiento: La falta de mantenimiento adecuado puede comprometer la resiliencia de una excavación a lo largo del tiempo. Junto con la supervisión las acciones de mantenimiento pueden disminuir los efectos adversos de una falla que se identificó a temprana edad y donde se realizan inspecciones regulares, reparaciones y medidas de conservación para garantizar la estabilidad a largo plazo.

En caso de que una excavación falle, es fundamental contar con un plan de contingencia y de respuesta a emergencias bien establecido, esto puede incluir evacuar el área, tomar medidas para proteger a los trabajadores y realizar reparaciones o estabilización de la excavación de manera segura. De los resultados también se puede concluir que, si se tienen claros los parámetros de resiliencia de la excavación, es posible determinar la influencia de cada uno después de un evento como la falla de fondo.

La metodología es fácil de aplicar, sin embargo, para el análisis de resiliencia por medio del operador OWA es necesario tener claridad en la actitud frente al riesgo que la persona o entidad evaluadora pueda llegar a tener, ya que se evidencia que los resultados varían respecto a la actitud que quiera asumir. De todas formas, es posible evidenciar los factores que aumentan o disminuyen la resiliencia del sistema.

Los resultados expuestos en los numerales 8 y 9, permiten concluir que la metodología aplicada para el cálculo de Resiliencia y el Índice de Resiliencia por medio de lógica difusa y operadores OWA proporcionan una gama de valores de acuerdo con la cantidad de riesgo que el evaluador y/o tomador de decisiones esté dispuesto a tomar, reflejando por medio de una actitud optimista o pesimista. La evaluación con el operador OWA determinó de manera correcta el porcentaje de aporte de cada parámetro de Resiliencia en los distintos momentos del cálculo, disminuyendo en gran medida la incertidumbre que supone el análisis subjetivo. La aplicación particular del operador OWA basado en el método lineal, permitió contemplar escenarios, optimistas, pesimistas y neutros, por medio de la orness,

donde el evaluador podría tomar en consecuencia decisiones que puedan mejorar los parámetros de resiliencia que se consideren críticos frente a las amenazas identificadas para el sistema, en este caso de la excavación y su entorno.

En el desarrollo de este trabajo se pudo establecer la aplicación de la lógica difusa en problemas de agregación de parámetros cualitativos y cuantitativos, por medio de la inferencia difusa. Se evidenció que es posible aplicar esta herramienta para calificar los parámetros que componen la resiliencia, en los cuales se tiene diversas cualidades cualitativas. El método proporciona de manera eficiente la calificación de cada criterio definido para los parámetros de resiliencia, presentando una ventaja cuando se cuenta con pocos datos de los fenómenos que se quieren medir, pero que, con base en la experiencia y conocimiento del comportamiento de las variables, permite el modelamiento de indicadores expresados en cualquier unidad de medida siempre que se establezcan las variables lingüísticas adecuadas.

Se comprobó la facilidad de la aplicación de la lógica difusa, debido a que no requiere conocer el modelo matemático que describe la dinámica del sistema, por tanto, el control difuso no requiere identificar el sistema, ni aproximar el modelo, ni dinamizarlo, lo cual requiere tiempo. A pesar de la facilidad existe una de desventajas y es que, aunque no se necesita un modelo matemático, se debe conocer las reglas lingüísticas (Reglas SI\_Entonces), que provienen de un experto en el sistema a controlar, sin embargo, en la aplicación de este proyecto se pudo establecer de manera sencilla y con la rigurosidad del caso las Variables lingüísticas, los Universo de discurso, los Términos lingüísticos y las Funciones de membresía de los criterios de entrada y salida de cada parámetro de resiliencia.

Otra desventaja de la aplicación de la lógica difusa es cuando se tiene un gran número de variables en el modelo por que se genera un fenómeno llamado “explosión de variables y dimensionalidad” [99], [100] sin embargo, la aplicación en este estudio fue posible dado a que los criterios establecidos para cada parámetro se configuro y limito a tres variables evitando el problema de dimensionalidad en el sistema de inferencia convencional de la lógica difusa.

Con este estudio de caso, se puede evidenciar como el índice de resiliencia a través de sus parámetros puede ayudar a prevenir y mejor aún, a reducir las consecuencias por las fallas de servicio, aportando conocimiento desde el diseño y la gestión de los sistemas para que sean resilientes a eventos, ya sean desde lo antrópico o lo natural. Una medida del índice de resiliencia podría acercarnos si el sistema debe ser estructurado desde la redundancia, la robustez, o por si lo contrario debe ser fortalecido desde la capacidad de gestión y la recuperación. En las excavaciones en un entorno urbano, se debe manejar un nivel mayor de riesgo en las diferentes etapas de construcción, ya que a causa de las deformaciones se puede presentar daños en la infraestructura de sistemas vitales para la comunidad, como lo es el acueducto, el alcantarillado, el sistema vial y las comunicaciones. La resiliencia puede dar una guía de estos aspectos y pueden ser incluidos en la gestión del riesgo de manera pronta, dicho de otra forma, desde una visión preventiva y no a nivel de mitigación y asistencial después de la emergencia y/o rehabilitación.

## **10.2 Recomendaciones**

La importancia de la cantidad y calidad de la información para cada uno de los parámetros de resiliencia es un factor determinante para poder generar un resultado óptimo que satisfaga la necesidad de evaluar, así, poder tomar acciones para que este indicador mejore; de lo anterior resalta la necesidad estratégica de la disponibilidad de la información por parte de las entidades públicas, ya que, al contar con bases de datos abiertas, se podría tener mejor detalle de parámetros de resiliencia, en especial, los relacionados con la capacidad de gestión y recuperación a nivel departamento, ciudad, municipio, etc.

Para enriquecer el análisis de Resiliencia se sugiere evaluar la metodología y establecer los parámetros con diferentes aspectos del componente económico, ya que en el área de la gestión del riesgo este factor es importante en la toma de decisiones al momento de enfrentar un evento disruptivo.

Se puede realizar un análisis adicional de la excavación estudiada de acuerdo a las características actuales y con ellas calcular cada uno de los criterios definidos de los parámetros resilientes y actualizar el índice de resiliencia de la excavación final, con el fin de evidenciar si las acciones correctivas frente al evento no solo consiguieron recuperar la funcionalidad del sistema, también, si con ellas se logró llegar a un valor de Resiliencia adecuado.

Puede ser interesante aplicar la metodología presentada en este documento a un análisis multitemporal de la excavación en el proyecto Green Office, ya que la información recolectada en los diferentes informes y archivos del caso se evidencia que el evento de falla de fondo fue progresivo y no una falla súbita de la excavación, por tanto se podría profundizar en el comportamiento de los parámetros resilientes hasta llegar a la falla es decir la Resiliencia en  $t_2$ .



## Bibliografía

- AEVAL. (2016). MARCO DE ACTUACIÓN Estrategia Distrital para la Respuesta a Emergencias. *Página Web*.
- Ainuddin, S., & Routray, J. K. (2012). Earthquake hazards and community resilience in Baluchistan. *Natural Hazards*, 63(2), 909–937. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0201-x>
- AI, A. C. de I. Sísmica., & Territorial, M. A. V. y D. (2010a). Nsr 10 Título H — Estudios Geotécnicos. *Reglamento Colombiano de Diseño y Construcción Sismo Resistente-NSR-10*, 72.
- Alegría, D. (2021a). Estudio De Metodologías De Diseño Resiliente En Infraestructura Pública. *Universidad de Chile*, 178.
- Asadi, M. (2016). Optimized Mamdani fuzzy models for predicting the strength of intact rocks and anisotropic rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(2), 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.005>
- Augusto, C., & Montoya, H. (2011). Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: La teoría Tools for reliability analysis in geotechnical engineering: The theory. *Herramientas Para Análisis Por Confiabilidad En Geotecnia: La Teoría Tools for Reliability Analysis in Geotechnical Engineering: The Theory*, 10(18), 69–78.
- Azarafza, M., Asghari-Kaljahi, E., Ghazifard, A., & Akgün, H. (2021). Application of fuzzy expert decision-making system for rock slope block-toppling modeling and assessment: a case study. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(1), 159–168. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00877-9>
- Basu, D., Misra, A., & Puppala, A. J. (2015). Sustainability and geotechnical engineering: perspectives and review. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(1), 96–113. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0120>
- Blanco-Mesa, F., León-Castro, E., & Acosta-Sandoval, A. (2020a). Toma de Decisiones Estratégicas en Entornos Inciertos. *Revista de Métodos Cuantitativos Para La Economía y La Empresa*, 30(30), 79–96. <https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.3845>

- Brinkgreve, R. (2005). Selection of Soil Constitutive Models and Parameters for Geotechnical Engineering Application. In ASCE (Ed.), *Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection and Calibration* (pp. 69–98). ASCE.
- Castillo, O., Ochoa, P., & Soria, J. (2021a). *Differential Evolution Algorithm with Type-2 Fuzzy Logic for Dynamic Parameter Adaptation with Application to Intelligent Control*.
- Cheng, Y. M., & Lau, C. K. (2008). Slope Stability Analysis and Stabilization. In *Slope Stability Analysis and Stabilization*. <https://doi.org/10.4324/9780203927953>
- Copyright, F. R., Company, F. S., & Only, F. E. (2007). Critical Thinking: Moving from Infrastructure Protection to Infrastructure Resilience. *Evaluation, February, 2005–2006*.
- Das, J. T., Banerjee, A., Puppala, A. J., & Chakraborty, S. (2019). Sustainability and resilience in pavement infrastructure: a unified assessment framework. *Environmental Geotechnics*, 1–13. <https://doi.org/10.1680/jenge.19.00035>
- Delgado, M., Duarte, O., & Requena, I. (2006). An arithmetic approach for the computing with words paradigm. *International Journal of Intelligent Systems*, 21(2), 121–142. <https://doi.org/10.1002/int.20123>
- Detyniecki, M. (2001a). *Fundamentals on Aggregation Operators \* Marcin DETYNiecki*. <http://www.lip6.fr/reports/index-eng.html>.
- Duarte, O. G. (1999). Sistemas de lógica difusa. Fundamentos. 22 *Revista Ingeniería e Investigación No. 42*, 42, 22–30.
- Duarte, O., & Téllez, S. (2018a). *A family of OWA operators based on Faulhaber's formulas*. 617.
- European Environment Agency. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview. Technical*, 19.
- Fodor, J., Marichal, J. L., & Roubens, M. (1995). Characterization of the Ordered Weighted Averaging Operators. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 3(2), 236–240. <https://doi.org/10.1109/91.388176>
- Francis, R., & Bekera, B. (2014a). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 121, 90–103.
- Goh, A. T. C., Kulhawy, F. H., & Wong, K. S. (2008). Reliability assessment of Basal-Heave stability for braced excavations in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(2), 145–153. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:2\(145\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:2(145))

- Gómez, N. (2016). *Fundamentos teóricos y lineamientos metodológicos para la incorporación del concepto de incertidumbre en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)*. 144. <http://www.bdigital.unal.edu.co/51922/>
- HATHEWAY, A. W. (1996). Slope Stability and Stabilization Methods. In *Environmental & Engineering Geoscience: Vol. II* (Issue 3, pp. 447–449). <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.ii.3.447>
- IDU. (2012). Plan de manejo de tránsito complementario por emergencia Av, Carrera 11 entre Calles 100 y 92. *Boletín de Prensa, 040*, 1–15.
- Instituto de Desarrollo Urbano, B. (2019). *INFORME DE GESTIÓN Y RESULTADOS AÑO 2019*. 1–114. [www.idu.gov.co](http://www.idu.gov.co)
- Internacional, C. (n.d.). *Infraestructura resiliente Un imperativo para Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL*.
- J. Michael Duncan Stephen G. Wright Thomas L. Brandon. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*.
- Jantzen, J. (1998). *Tutorial On Fuzzy Logic*. 1998(98-E-868 (logic)), 1–20.
- Jazmin Natalia Pedreros Alba Nancy Viviana Roncancio Cabrejo. (2022a). *Estimación Del Índice De Resiliencia De Un Sistema De Excavación Para Sótanos En Bogotá D.C., Estudio De Caso: Torre Administrativa Sena*. 144.
- John Dunnycliff. (1998). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance-Wiley-Interscience (1988)*.
- Koren, D., Kilar, V., & Rus, K. (2018a). A conceptual framework for the seismic resilience assessment of complex urban systems. *16th European Conference on Earthquake Engineering, July*.
- Lee, M. (2016a). *Resilience assessment in geotechnical engineering*. University of Waterloo.
- Li, Y., Luo, Z., Chen, Q., & Wang, L. (2016). *System reliability-based geotechnical design of braced excavations in soft clays*. May, 28–30.
- Lu, X., Liao, W., Fang, D., Lin, K., Tian, Y., Zhang, C., Zheng, Z., & Zhao, P. (2020a). Quantification of disaster resilience in civil engineering: A review. *Journal of Safety Science and Resilience*, 1(1), 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2020.06.008>
- Lu, X., Liao, W., Fang, D., Lin, K., Tian, Y., Zhang, C., Zheng, Z., & Zhao, P. (2020c). Quantification of disaster resilience in civil engineering: A review. *Journal of Safety Science and Resilience*, 1(1), 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2020.06.008>
- Mahmoudabadi, V., & Ravichandran, N. (2018). Coupled geotechnical-hydrological design of shallow foundation considering site specific data - theoretical framework

- and application. *Journal of GeoEngineering*, 13(3), 93–103.  
[https://doi.org/10.6310/jog.201809\\_13\(3\).1](https://doi.org/10.6310/jog.201809_13(3).1)
- Maia, A., & Assis, A. (2004a). Etapas para Estudos Probabilísticos Aplicados a Geotecnia. *Anais\dots, December*, 1–6.
- Martínez, D. L. L. R., & Acosta, J. C. (2015). Aggregation Operators Review - Mathematical Properties and Behavioral Measures. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 7(10), 63–76.  
<https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.10.08>
- Mc Carthy, J. A., Pommerening, C., Otros, Copyright, F. R., Company, F. S., & Only, F. E. (2007a). Critical Thinking: Moving from Infrastructure Protection to Infrastructure Resilience. *CIP Program Discussion Paper Series, February*, 2005–2006.
- Mendel, J. M. (1995a). Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 83(3), 345–377. <https://doi.org/10.1109/5.364485>
- NIAC. (2009a). *Critical Infrastructure Resilience Final Report and Recommendations*. [www.dhs.gov/xlibrary/assets/.../niac\\_critical\\_infrastructure\\_resilience.pdf](http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/.../niac_critical_infrastructure_resilience.pdf)
- Obrzud, R. F. (2010). On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice. *Numerics in Geotechnics and Structures*, 16.
- Olaya, D. A. (2015a). *Criterios Geotécnicos para el Diseño de Excavaciones en Suelos Blandos Mediante El Método de Elementos Finitos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Orwin, K. H., & Wardle, D. A. (2004). New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(11), 1907–1912. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.04.036>
- Rasper, Anke. (2016a). *La infraestructura es clave para evitar desastres*. 1–3.
- Rincón Aguirre, A. J., & Bonilla Parra, M. A. (2021). *Estimación Del Índice De Resiliencia En Tres Estructuras De Contención En La Vía Sibaté - Fusagasugá*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Rogers, C. D. F., Bouch, C. J., Williams, S., Barber, A. R. G., Baker, C. J., Bryson, J. R., Chapman, D. N., Chapman, L., Coaffee, J., Jefferson, I., & Quinn, A. D. (2012b). Resistance and resilience - paradigms for critical local infrastructure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, 165(2), 73–84.  
<https://doi.org/10.1680/muen.11.00030>

- Schweiger, H. (2010a). Design of deep excavations with FEM - influence of constitutive model and comparison of EC7 design approaches. *American Society of Civil Engineers*, 804–817.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. In *Colección guías y manuales*.
- Shahin, M. A., Jaksa, M. B., & Maier, H. R. (2009). Recent Advances and Future Challenges for Artificial Neural Systems in Geotechnical Engineering Applications. *Advances in Artificial Neural Systems, 2009*, 1–9.  
<https://doi.org/10.1155/2009/308239>
- Slashchov, A., & Yalanskyi, O. (2019). Substantiation of fuzzy logic algorithms for control problems of a geotechnical systems. *E3S Web of Conferences*, 109.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900091>
- Sungay, B., Cakti, E., & Erdik, M. (2012a). Discussing Vulnerability, Capacity And Resilience of The Community In The Face of Earthquakes At A Microscale. *World Conference Earthquake Engineering*.
- The MathWorks, I. (1999). Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB. *User's Guide Version 2, 104(7)*, 235.
- Tierney, K., & Bruneau, M. (2007a). A Key to Disaster Loss Reduction. *TR News*, 14–18.
- Tierney, K., & Bruneau, M. (2007b). Conceptualizing and Measuring Resilience, A Key to Disaster Loss Reduction. *TR News*, 14–18.  
[http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews250\\_p14-17.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews250_p14-17.pdf)
- Torres M., Alvaro y Tranchita R., C. (2004a). ¿INFERENCIA Y RAZONAMIENTO PROBABILÍSTICO O DIFUSO? *Revista de Ingeniería UNIANDES*, 19, 157–166.  
<https://doi.org/10.16924/revinge.19.17>
- Tránsito, T. I., de Planeación, M., Diseño Para, Y., Administración, L. A., Tránsito, D., El, Y., Alcaldía Mayor De Bogotá, T., Mendoza, C. E., Subsecretario, L., Triana, H., Interventor, A., Fernando, W., & Triana, C. (n.d.). *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte*.
- V, O. G. D. (2000). Aplicaciones de la Lógica Difusa. *Revista Ingeniería e Investigación No. 45*, 5–12.
- Vesga Rojas, H. F. (2018a). Nuevas formas para optimizar la gestión del riesgo desde la perspectiva de territorios resilientes en Colombia. *Espacios*, 39(8).
- Weikert Bicalho, F. (2019a). La resiliencia de los servicios de infraestructura en América Latina y el Caribe: un abordaje inicial. *Boletín 374 / Facilitación, Comercio Y Logística En América Latina Y El Caribe*, 6(1564–4227), 1–16.

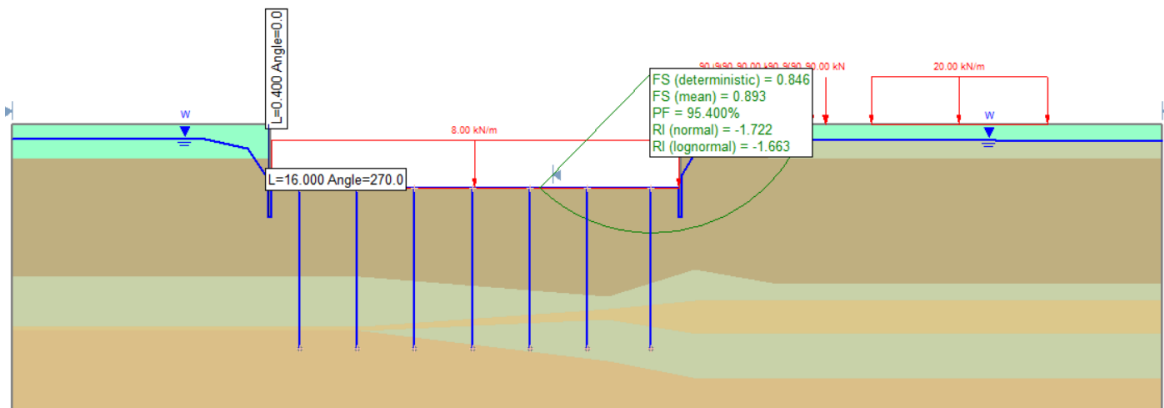
- Weikert Bicalho, F. (2019b). La resiliencia de los servicios de infraestructura en América Latina y el Caribe: un abordaje inicial. *Boletín 374 / Facilitación, Comercio Y Logística En América Latina Y El Caribe*, 6(1564–4227), 1–16.
- Wied, M., Oehmen, J., & Welo, T. (2020a). Conceptualizing resilience in engineering systems: An analysis of the literature. *Systems Engineering*, 23(1), 3–13. <https://doi.org/10.1002/sys.21491>
- Williams, M. B., Griffiths, D. V., & Fenton, G. a. (2005). Reliability of traditional retaining wall design. *Géotechnique*, 55(1), 55–62. <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.1.55>
- Zheng, G., Cheng, X., Zhou, H., Zhang, T., Diao, Y., Wang, R., Yi, F., & Guo, W. (n.d.). *Resilient evaluation and control in Geotechnical and Underground Engineering*.
- Zhishen Wu, Xilin Lu, & Mohammad Noori. (2020a). RESILIENCE OF CRITICAL INFRASTRUCTURE SYSTEMS. In Zhishen Wu, Xilin Lu, & Mahammad Noori (Eds.), *CRC Press* (Vol. 4, Issue 1). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Zobel, C. W., & Khansa, L. (2014). Characterizing multi-event disaster resilience. *Computers and Operations Research*, 42, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.024>

## **A. Anexo: Modelos Slide de la excavación**

## A. Anexo: Modelos Slide de la excavación

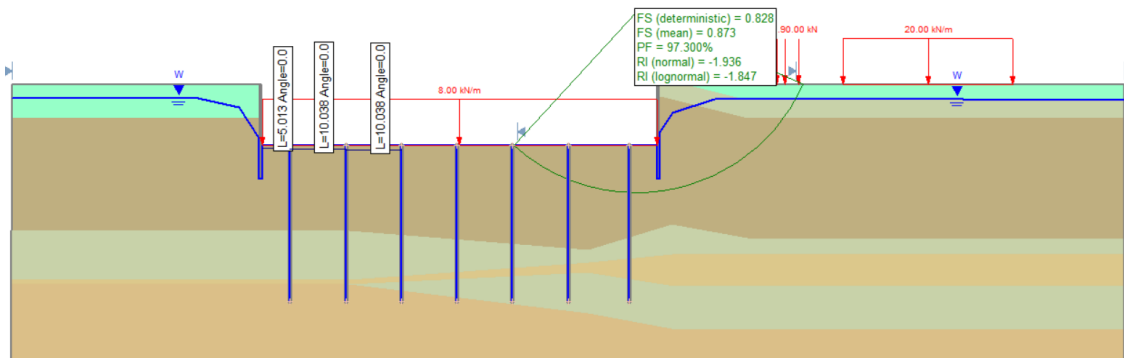
En esta sección se presentan los resultados de simulación en el software Slide, para las dos secciones perpendiculares descritas en el documento, con variaciones de carga sobre la excavación (8kN/m y 16 kN/m) y diferentes características geométricas del apantallamiento.

**Figura A - 1:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 16 m.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

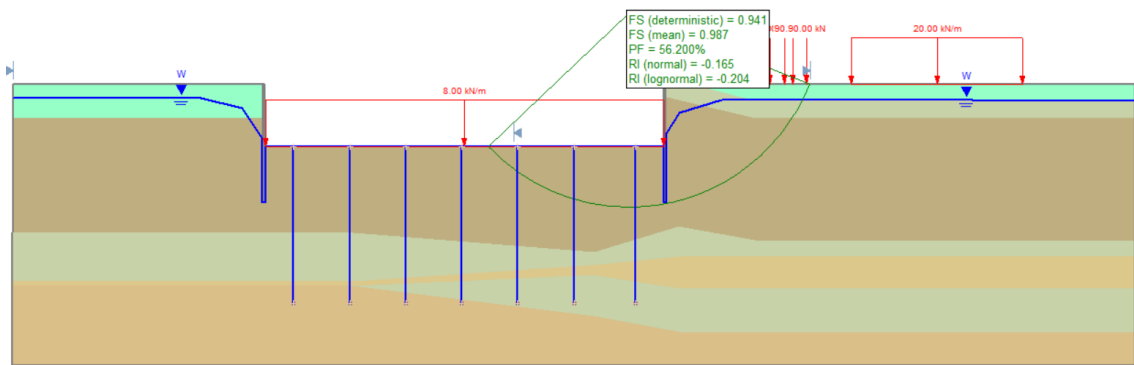
**Figura A - 2:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 17 m.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

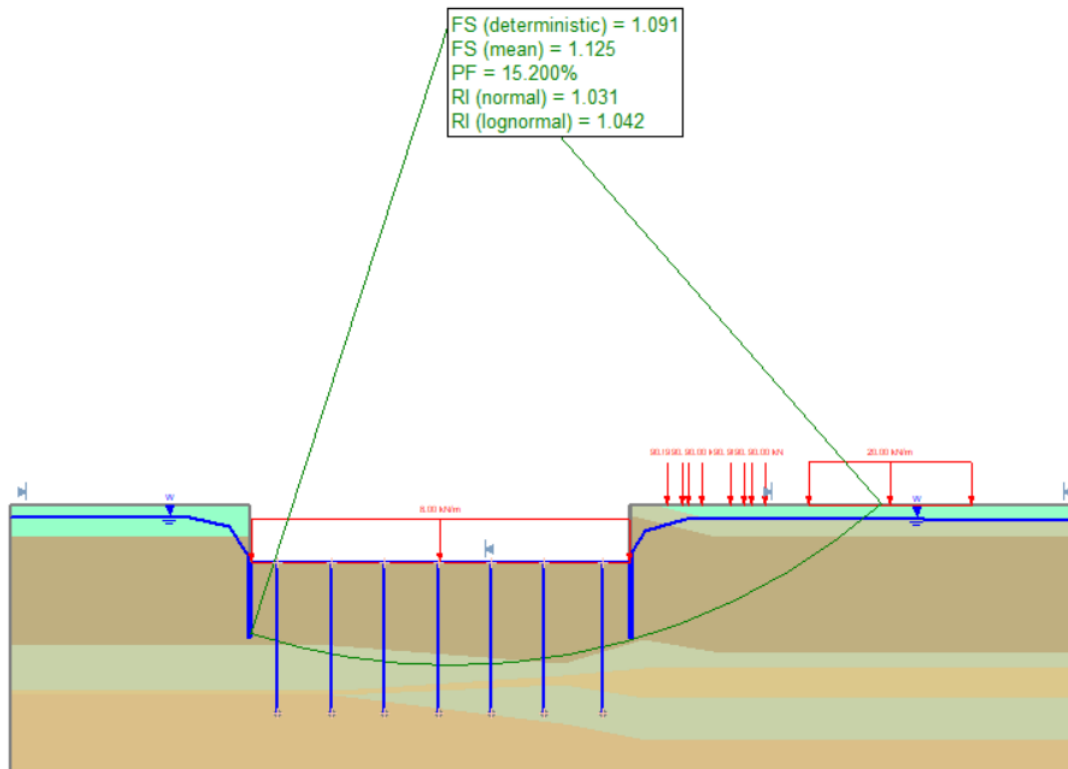


**Figura A - 3:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 21 m.



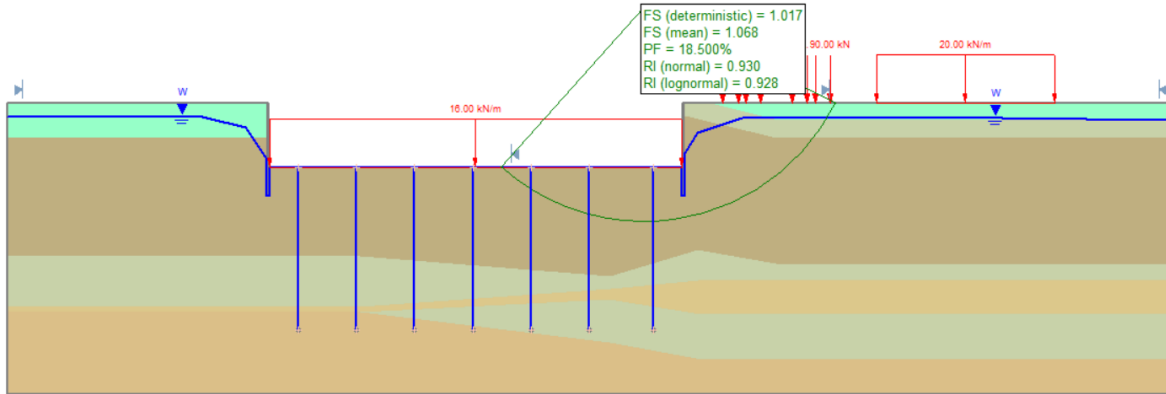
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 4:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 25 m.



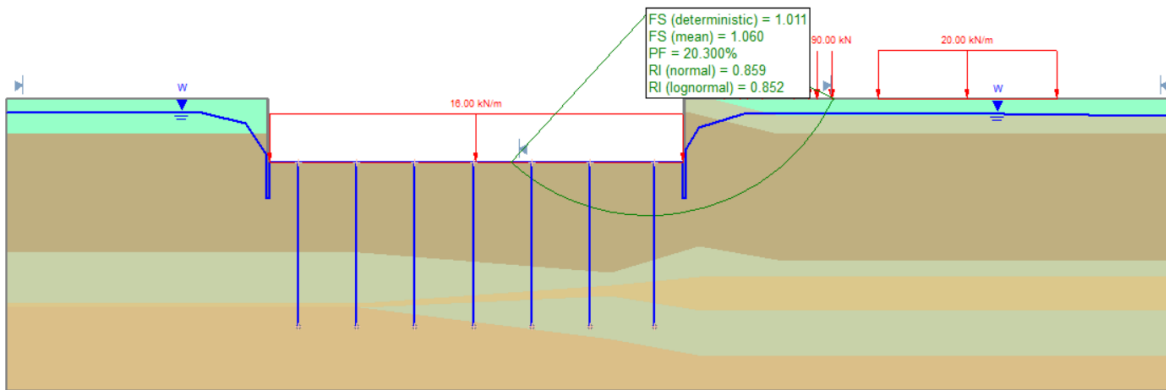
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 5:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 16 m.



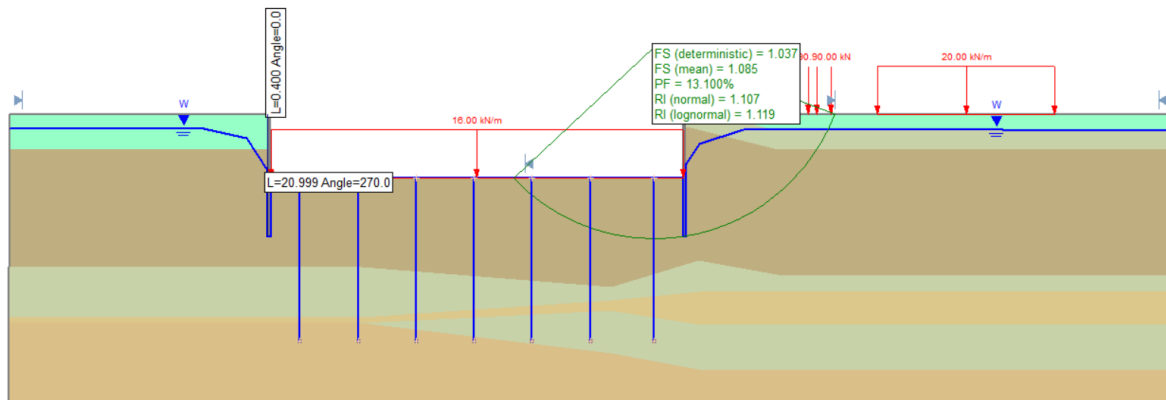
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 6:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 17 m.



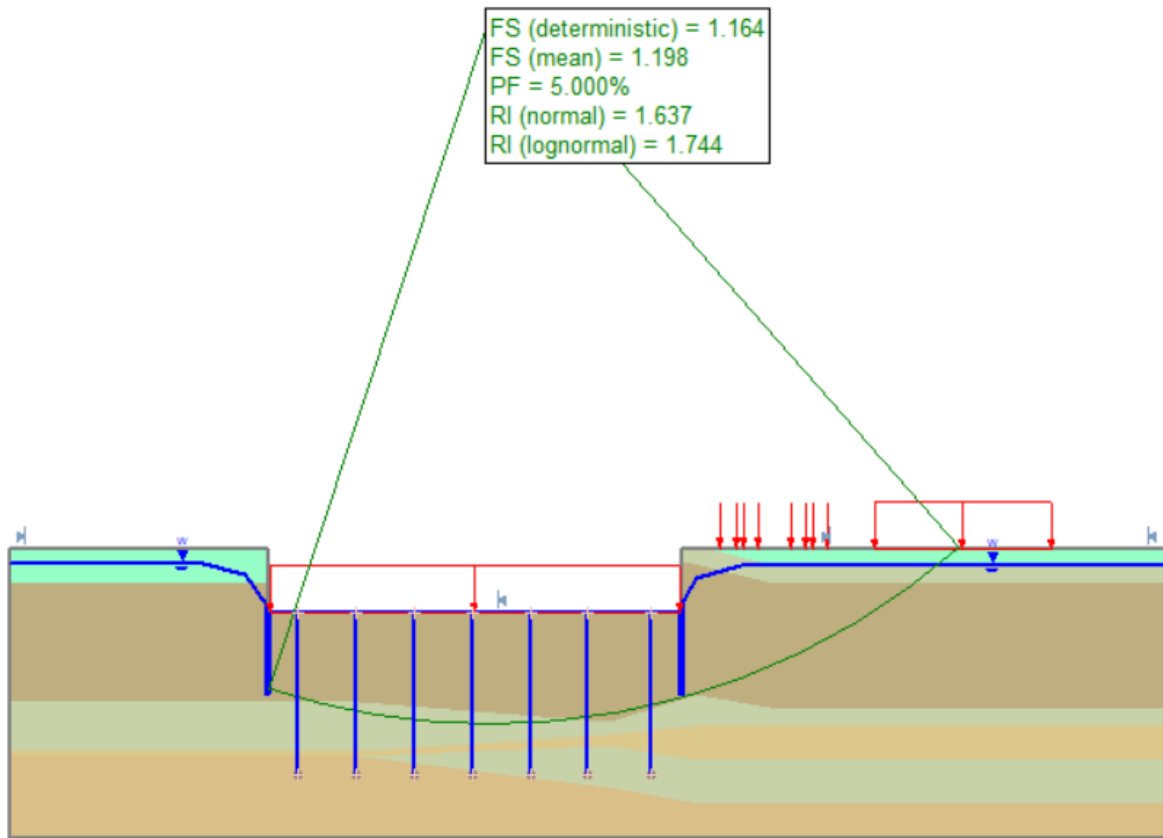
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 7:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 21 m.



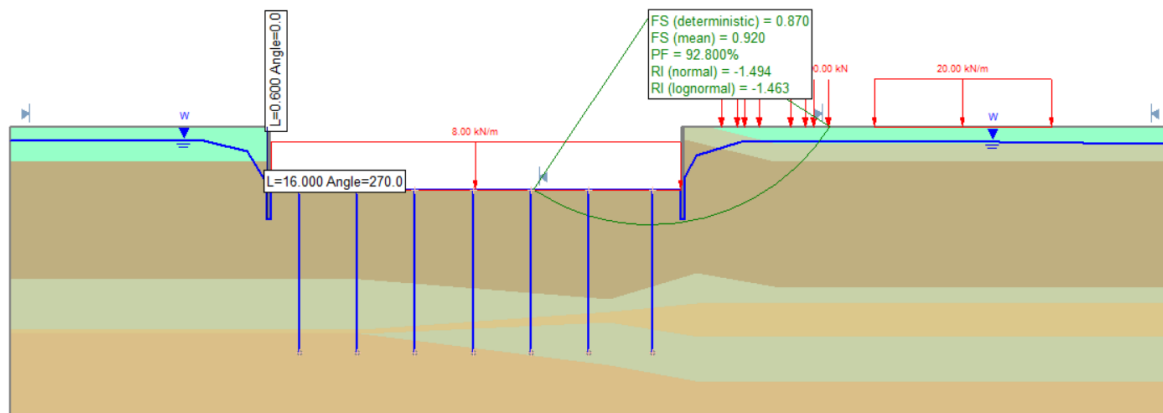
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 8:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 25 m.



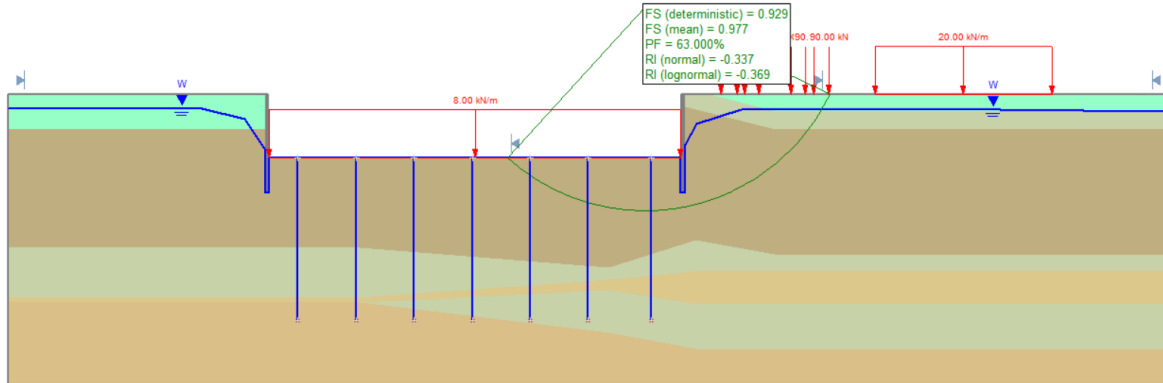
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 9:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 16 m.



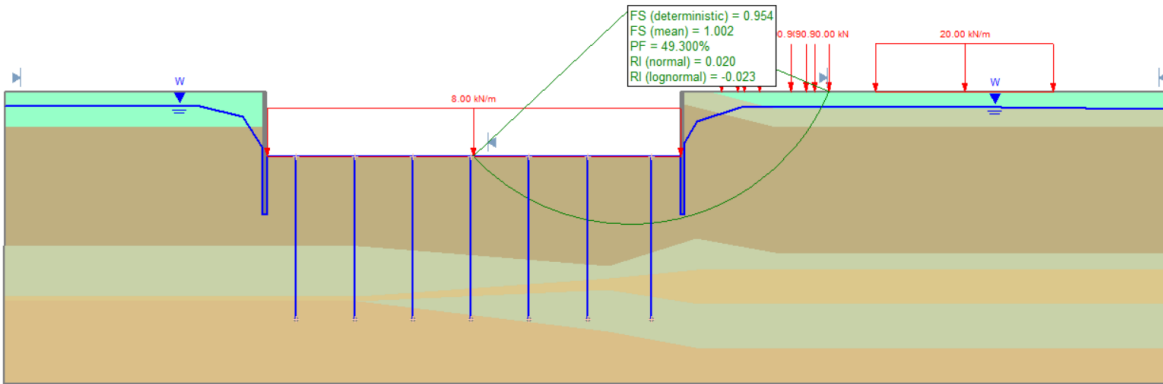
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 10:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 17 m.



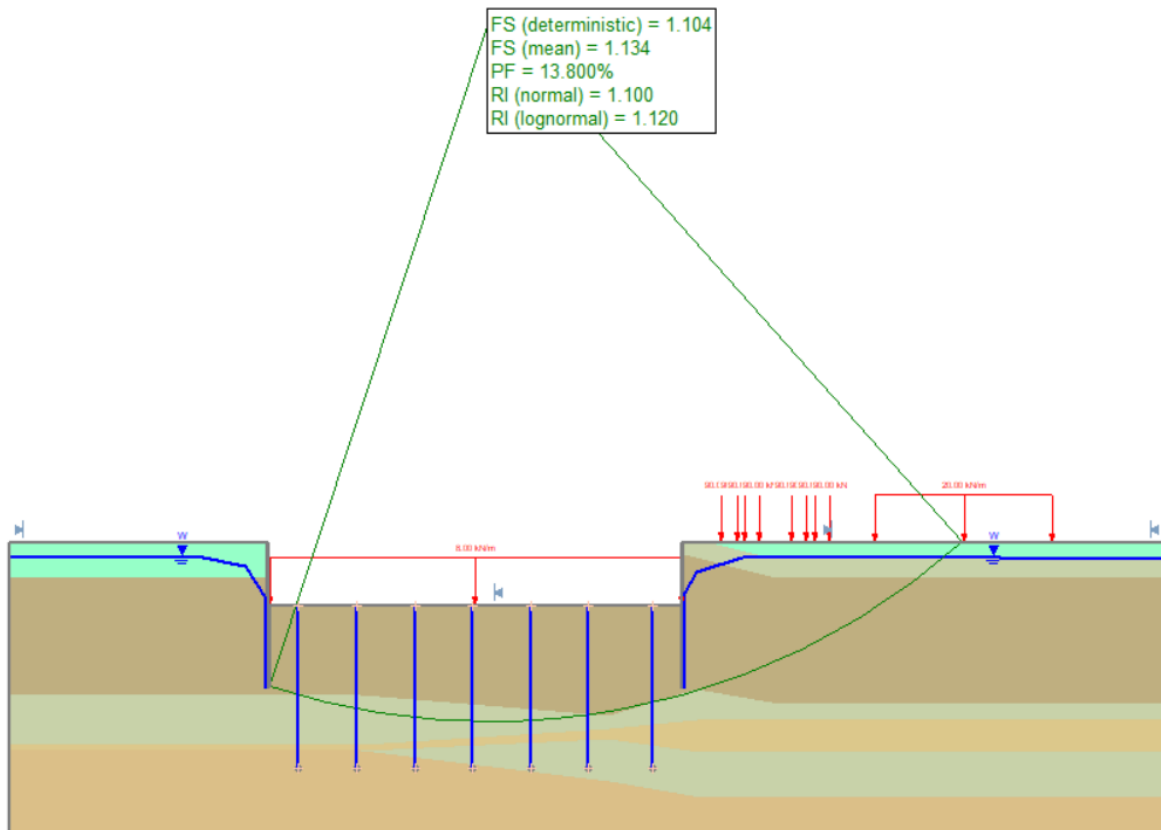
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 11:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 21 m.



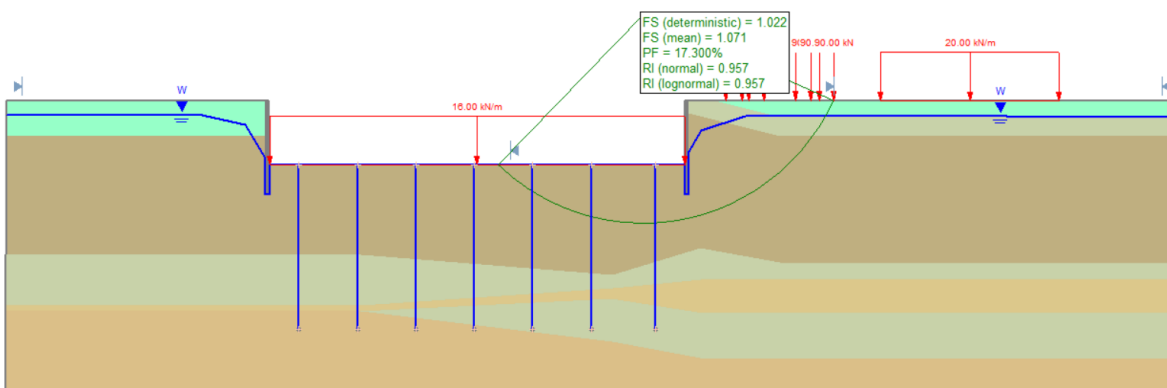
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 12:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 25 m.



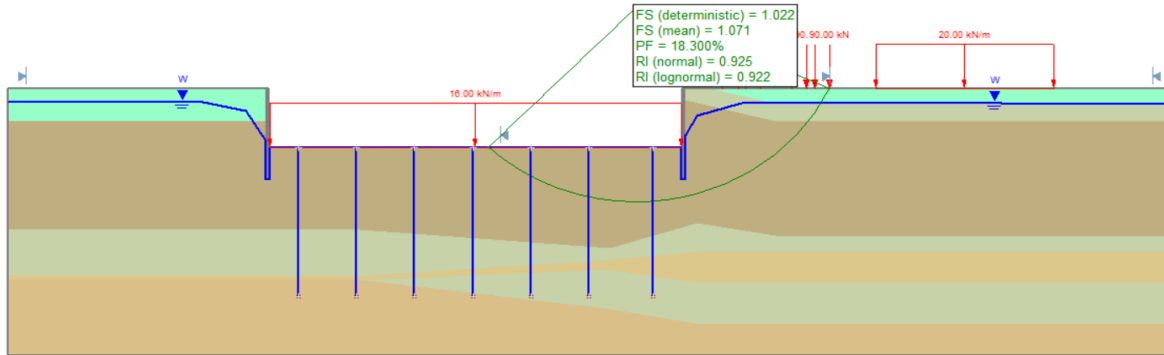
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 13:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 16 m.



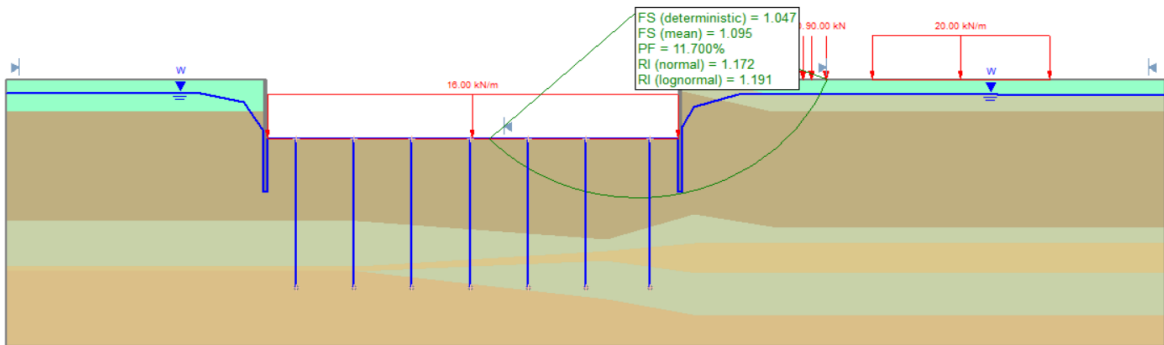
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 14:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 17 m.



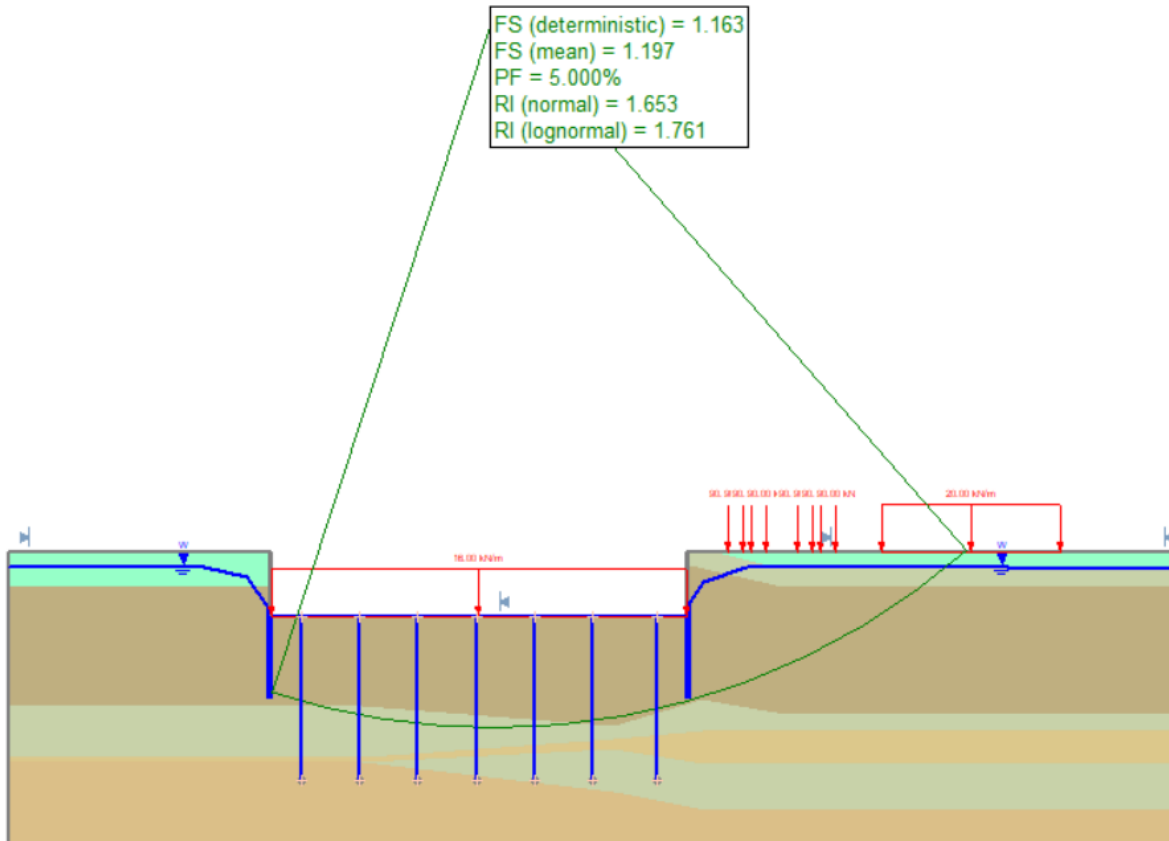
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 15:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 21 m.



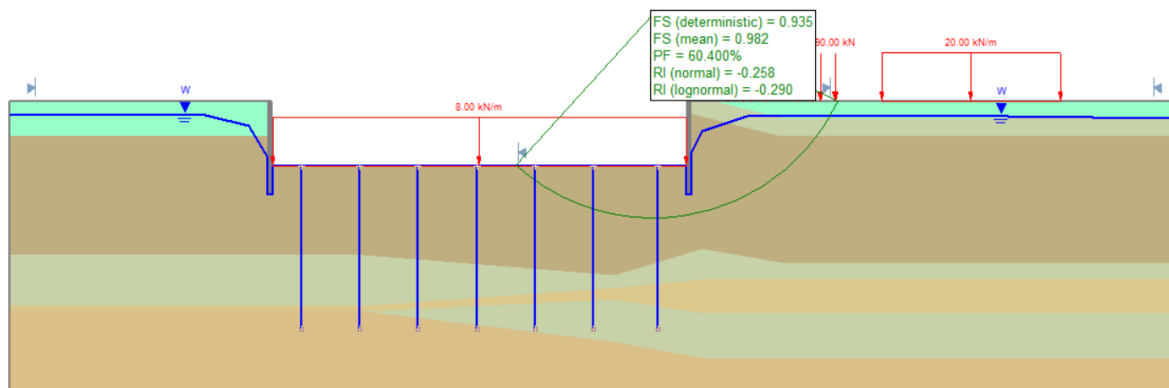
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 16:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 25 m.



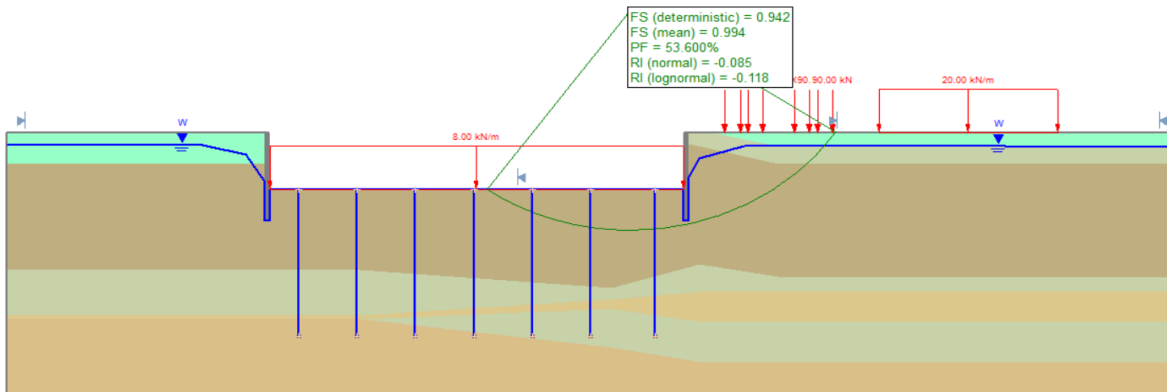
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 17:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 16 m.



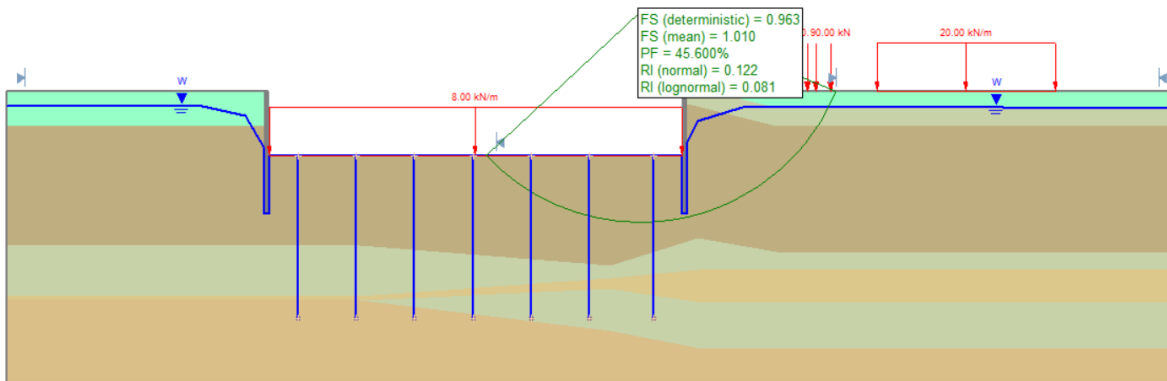
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 18:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 17 m.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

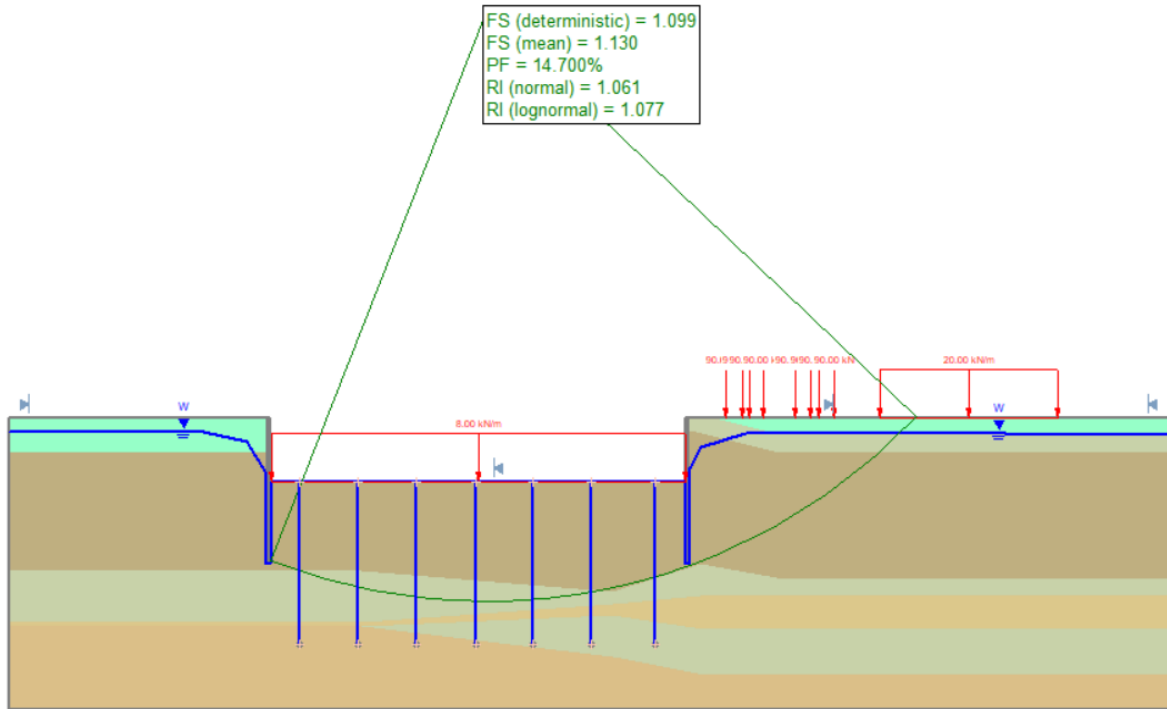
**Figura A - 19:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 21 m.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

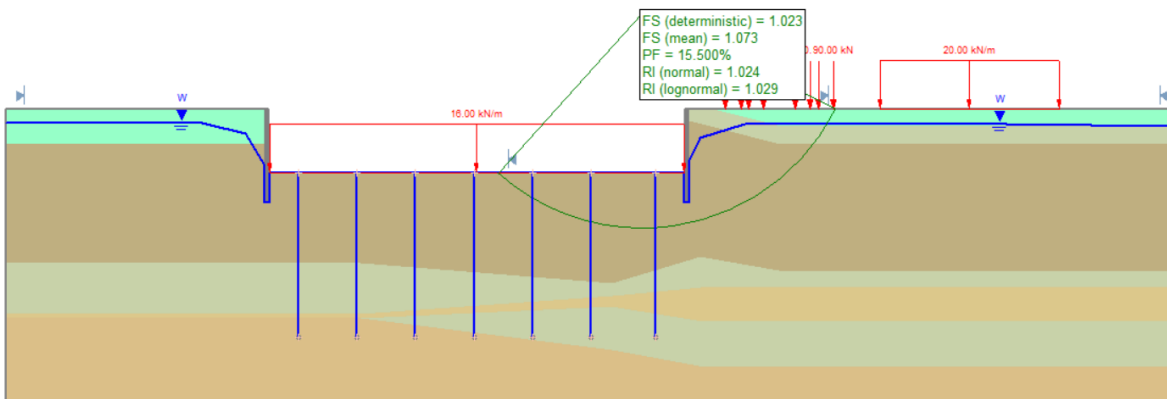


**Figura A - 20:** Sección 1, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 25 m.



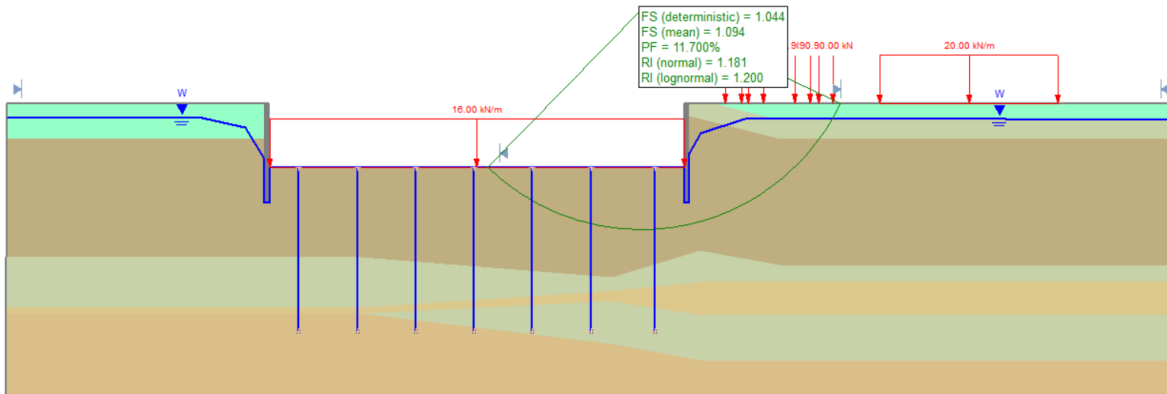
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 21:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 16 m.



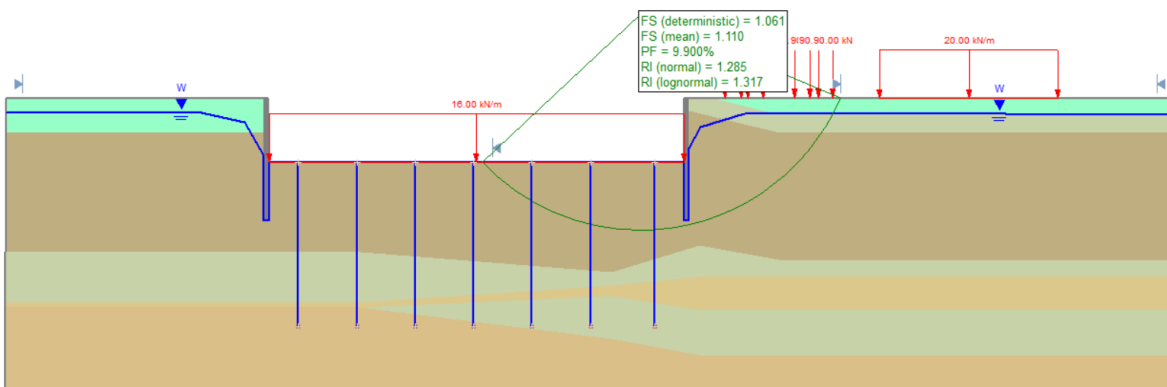
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 22:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 17 m.



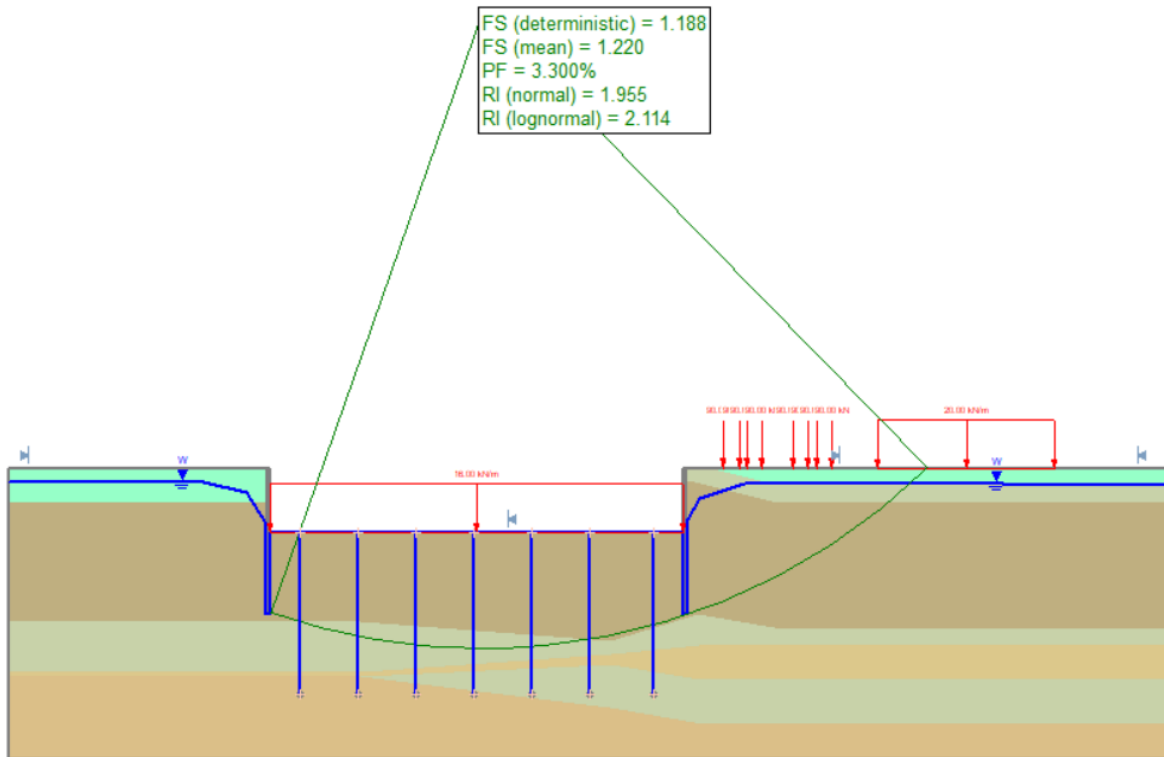
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 23:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 21 m.



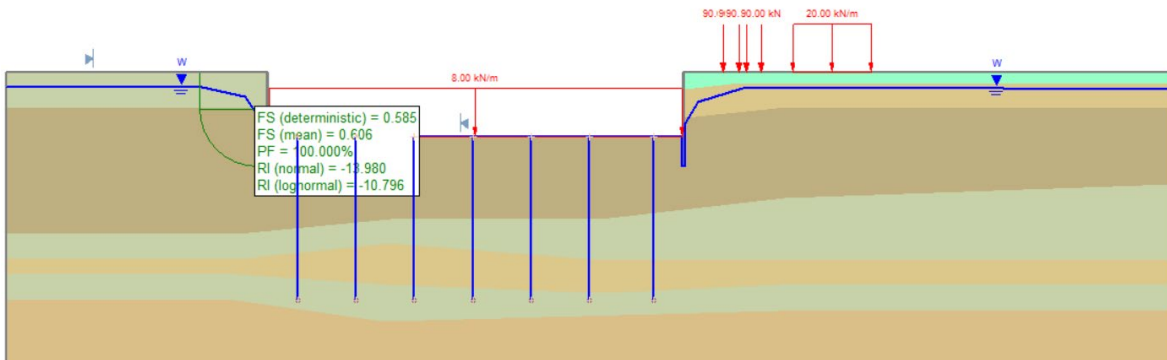
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 24:** Sección 1, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 25 m.



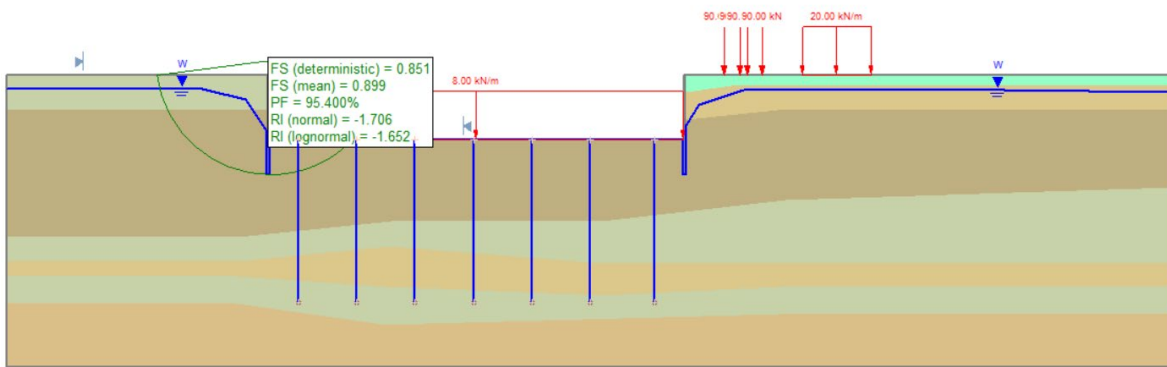
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 25:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 16 m.



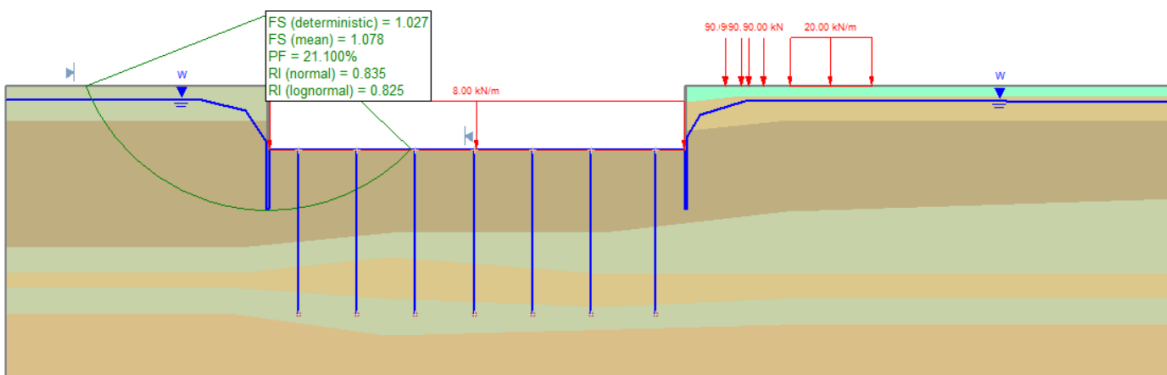
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 26:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 17 m.



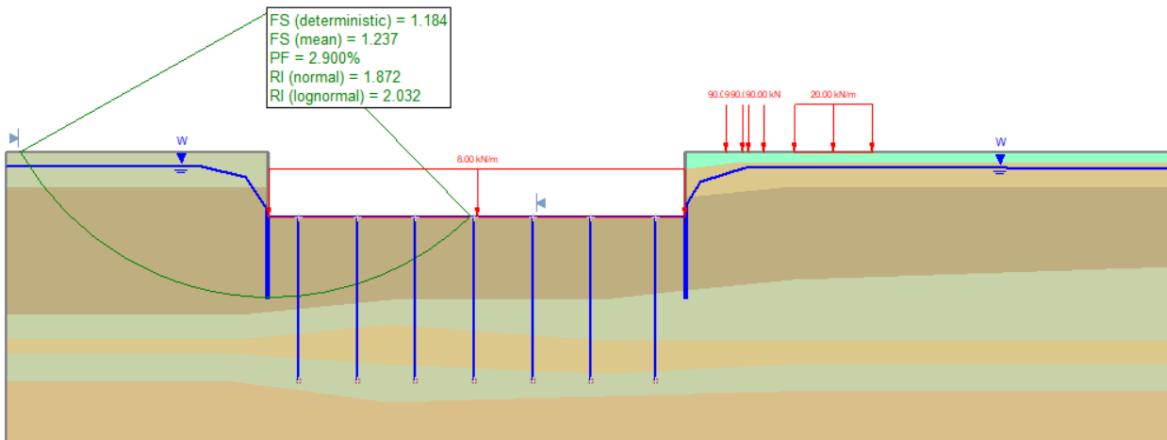
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 27:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 21 m.



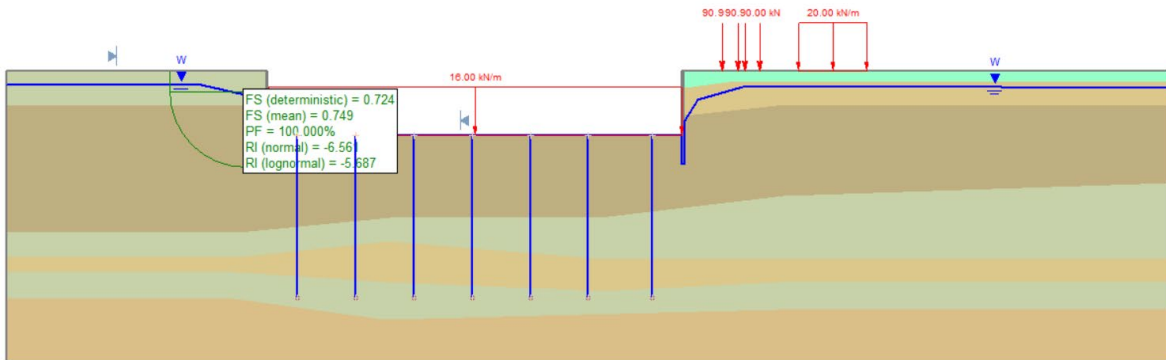
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 28:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 25 m.



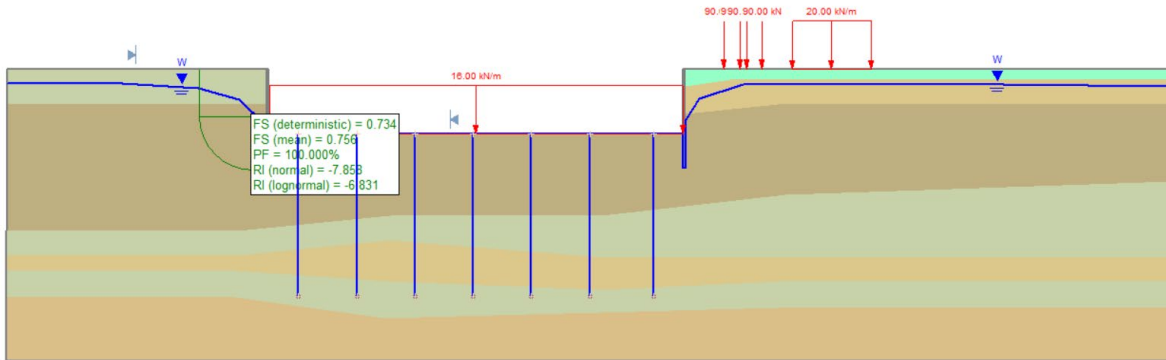
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 29:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 16 m.



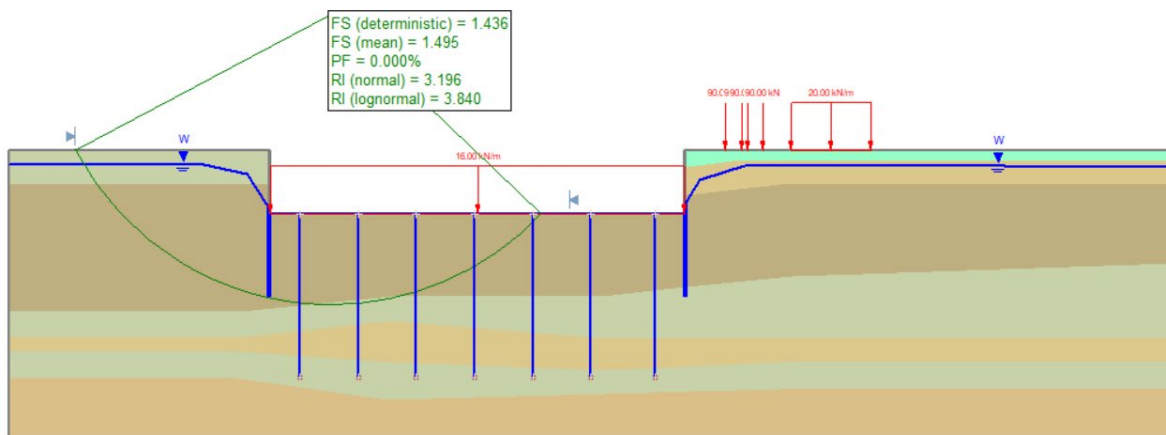
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 30:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 17 m.



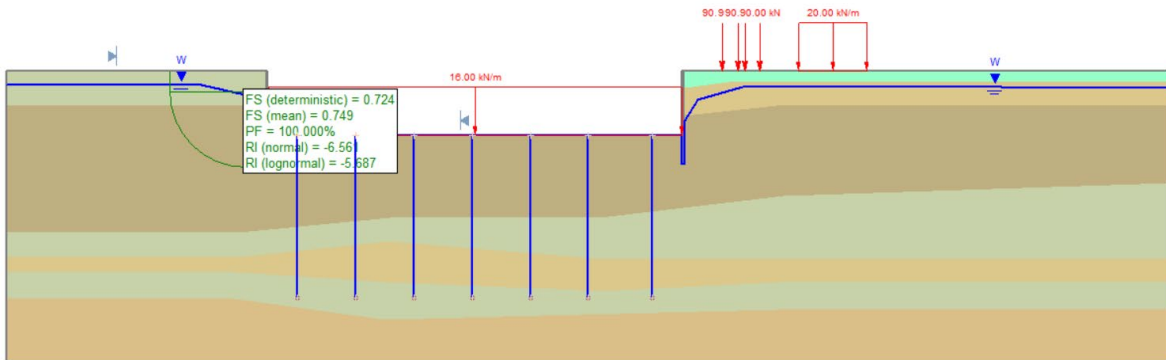
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 31:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 21 m.



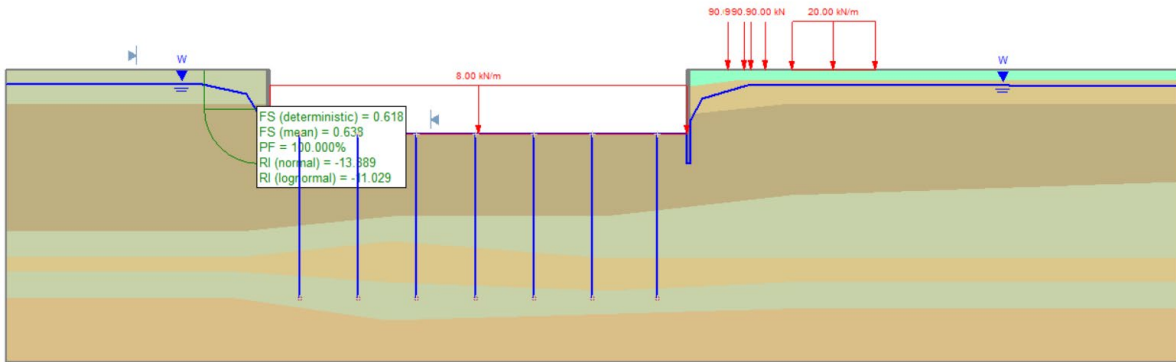
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 32:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.4 m, profundidad pantalla 25 m.



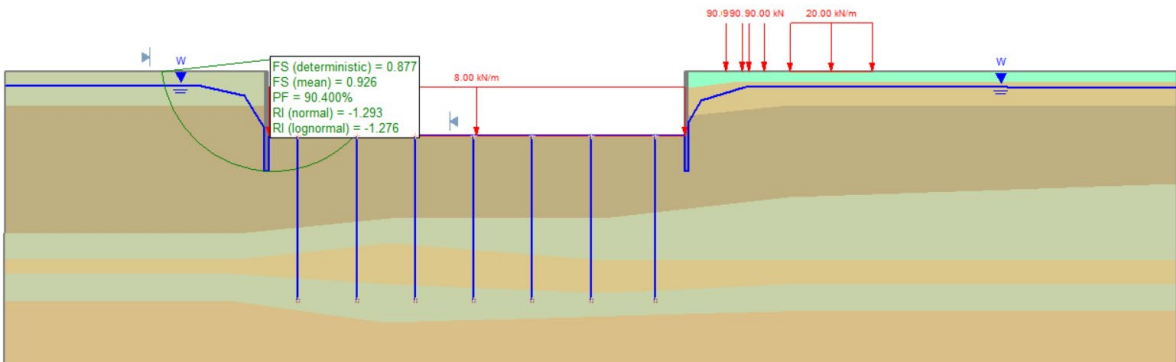
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 33:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 16 m.



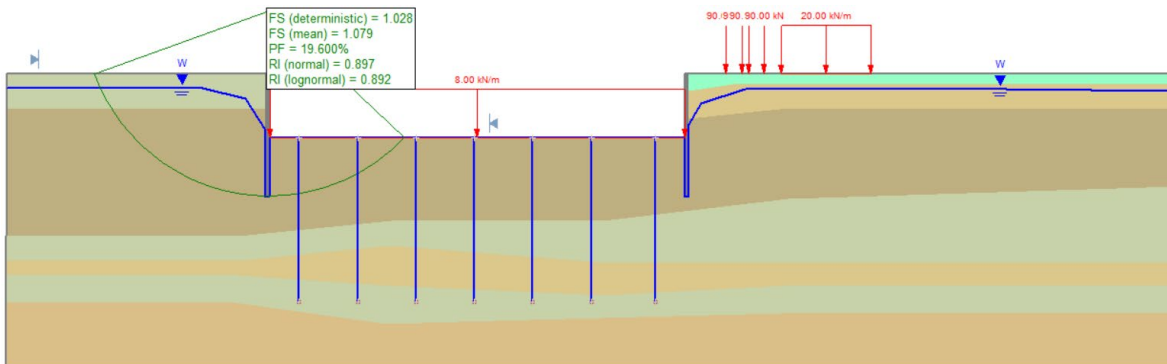
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 34:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 17 m.



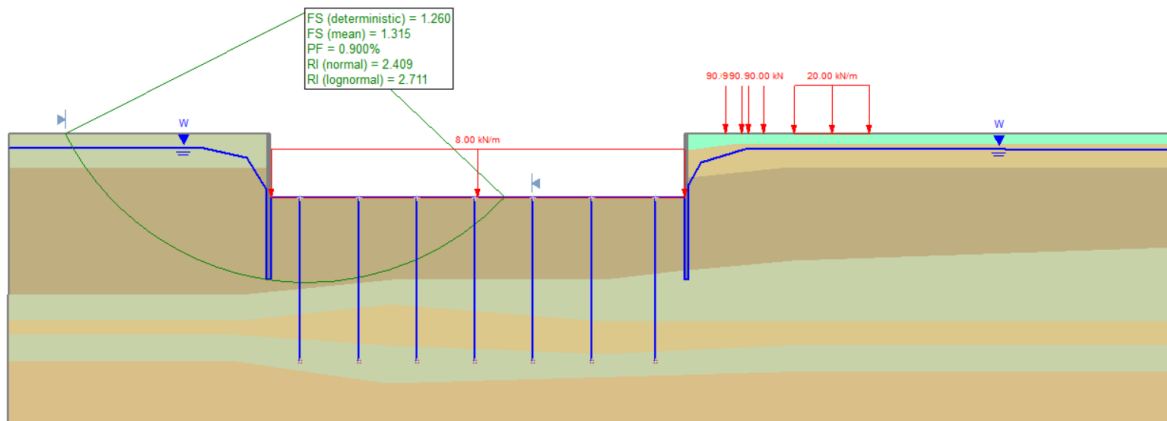
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 35:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 21 m.



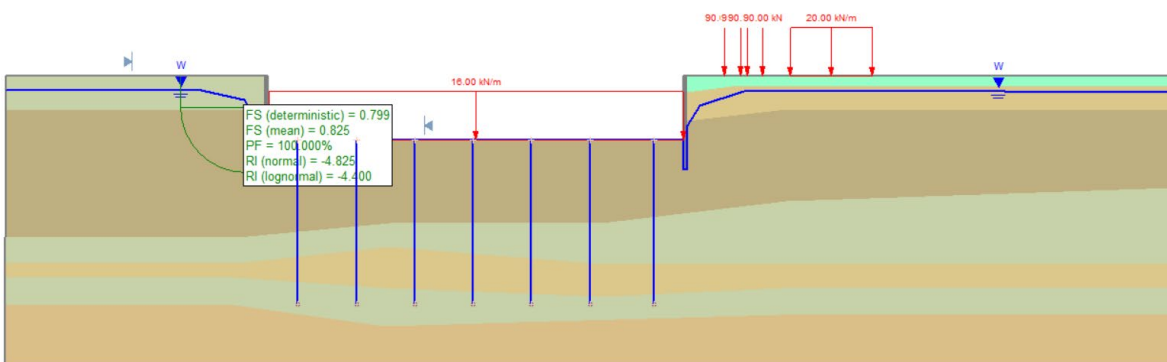
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 36:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 25 m.



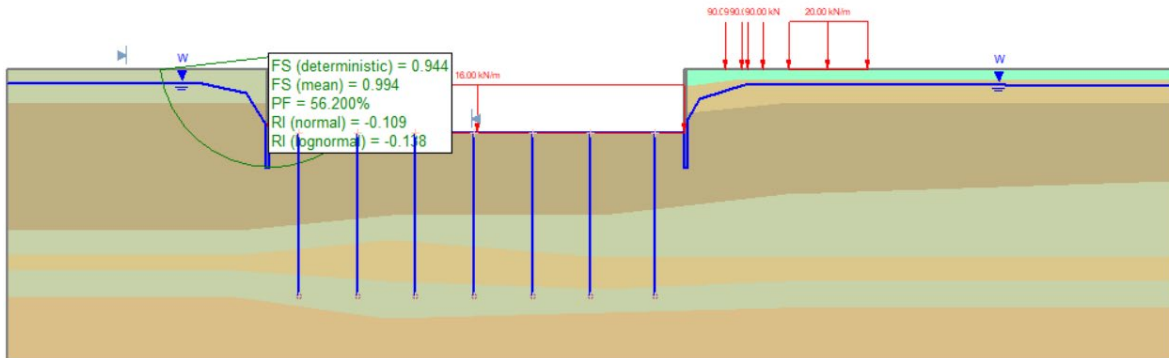
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 37:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 16 m.



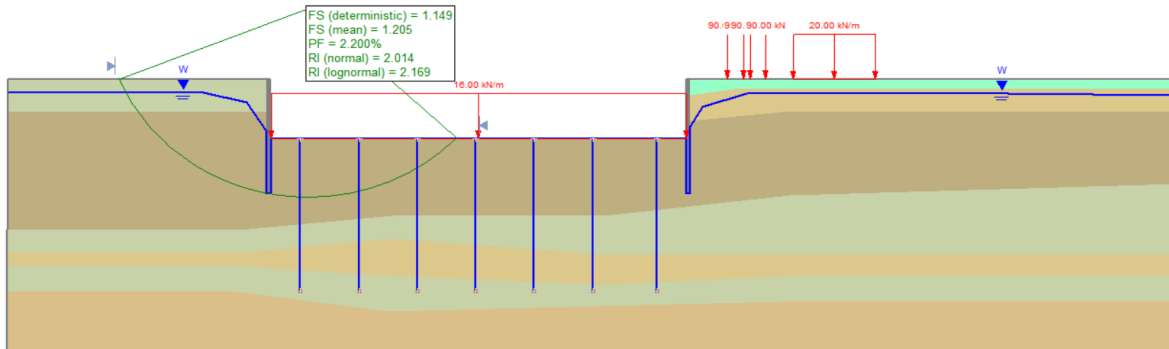
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 38:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 17 m.



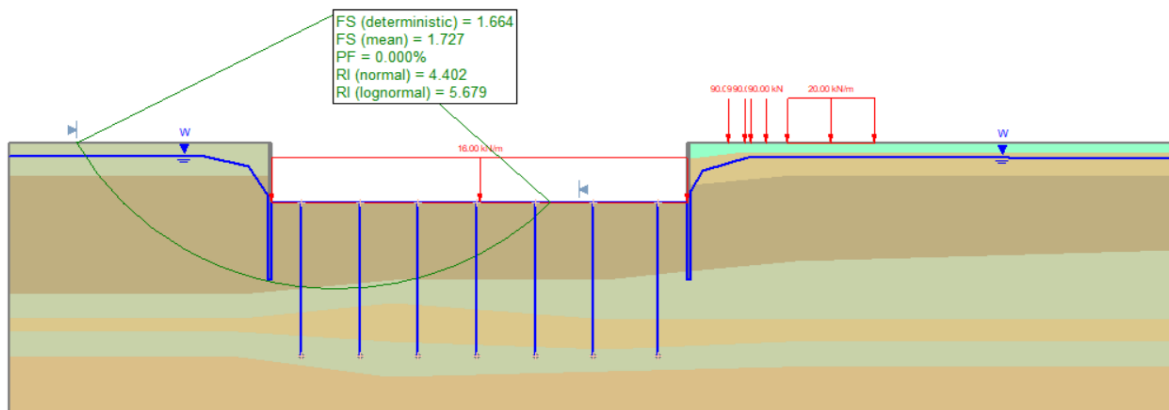
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 39:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 21 m.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

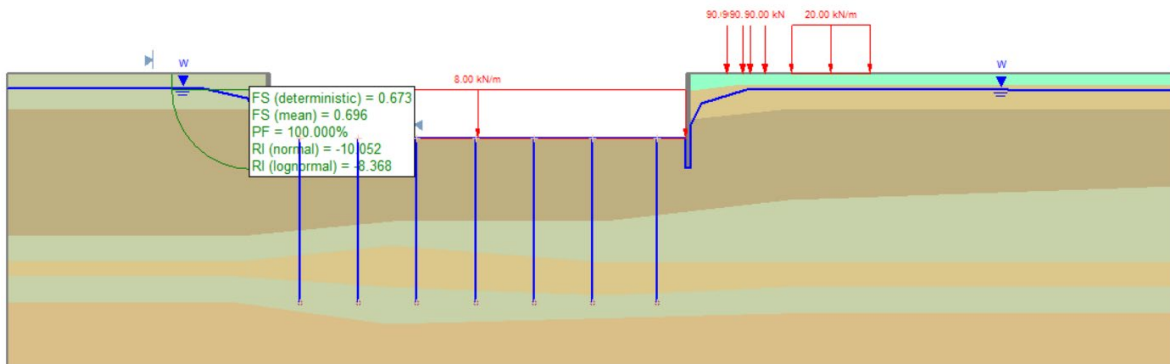
**Figura A - 40:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.6 m, profundidad pantalla 25 m.





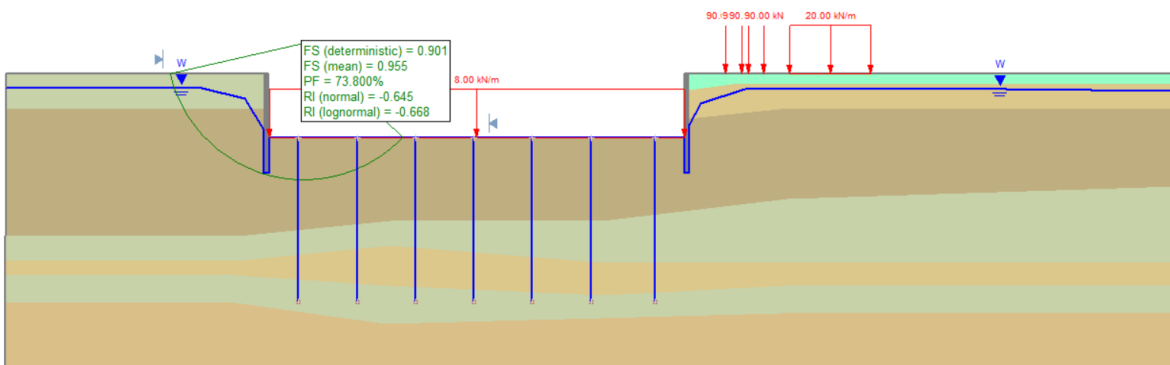
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 41:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 16 m.



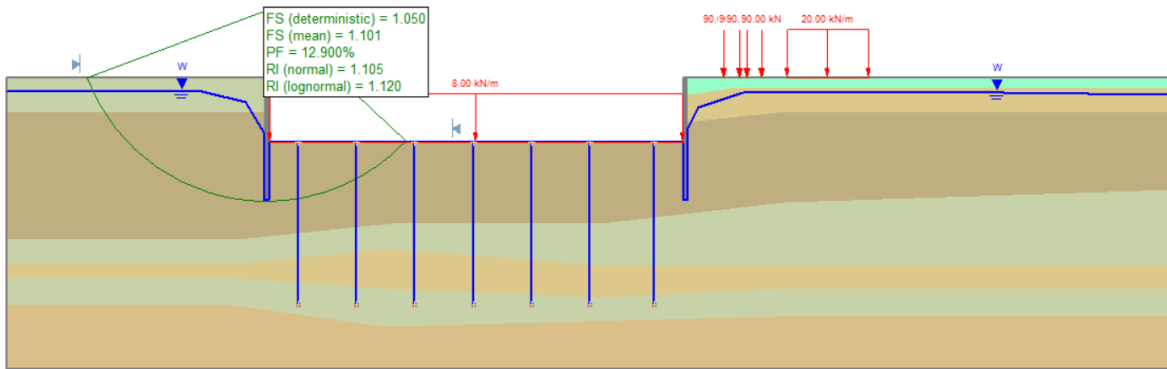
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 42:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 17 m.



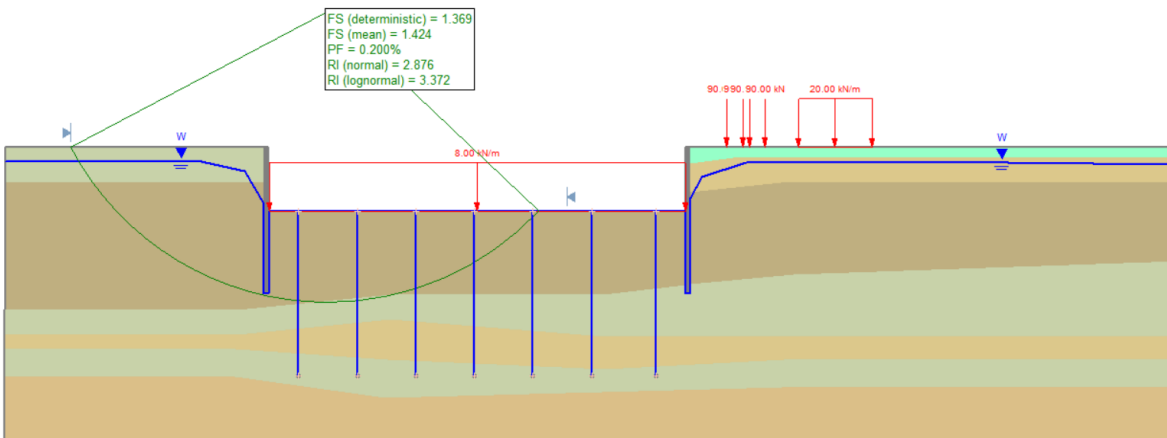
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 43:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 21 m.



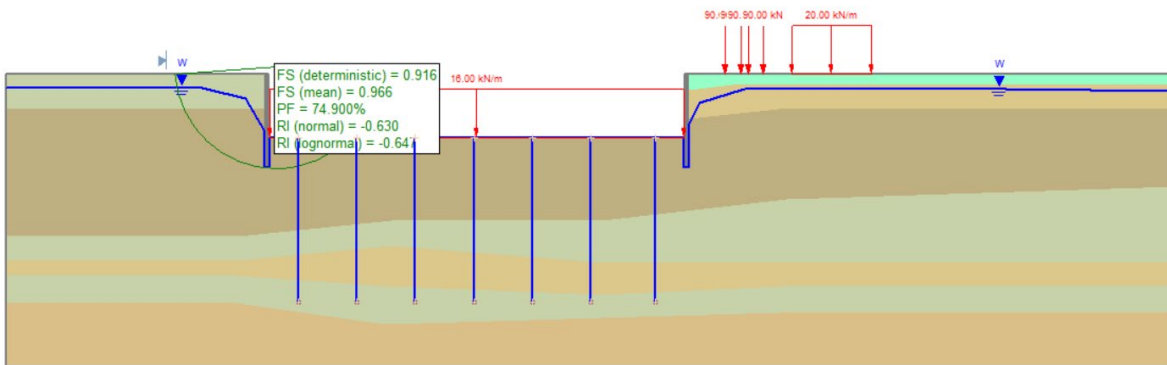
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 44:** Sección 2, carga 8 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 25 m.



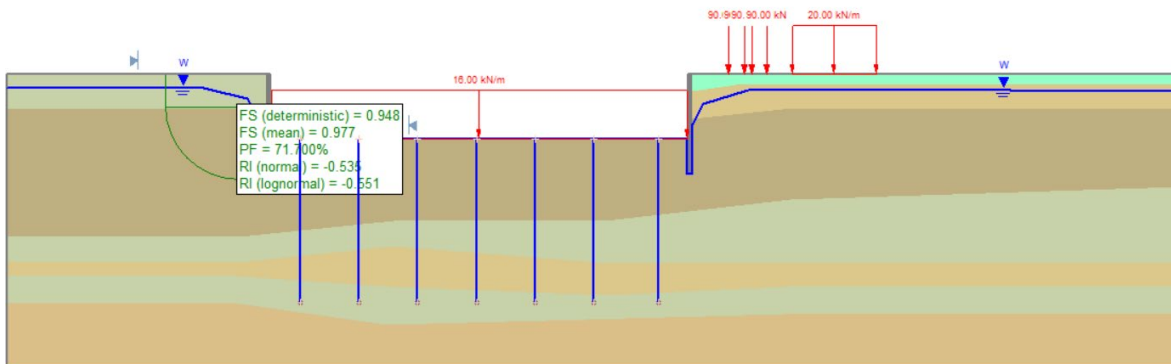
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 45:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 16 m.



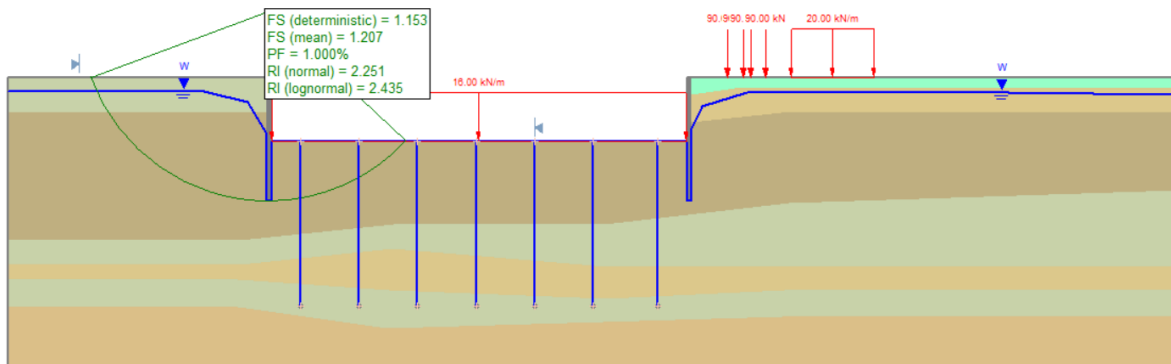
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 46:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 17 m.



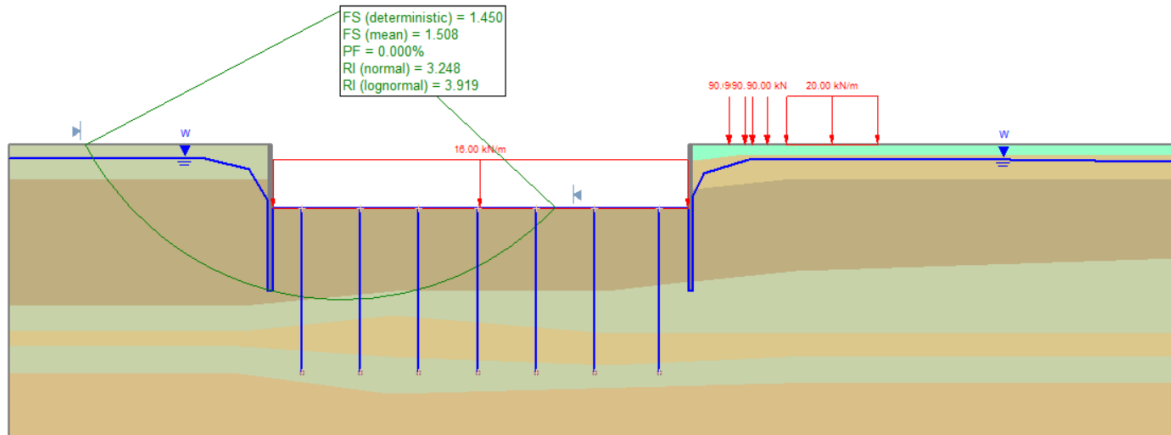
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 47:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 21 m.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

**Figura A - 48:** Sección 2, carga 16 kN/m, ancho pantalla 0.8 m, profundidad pantalla 25 m.



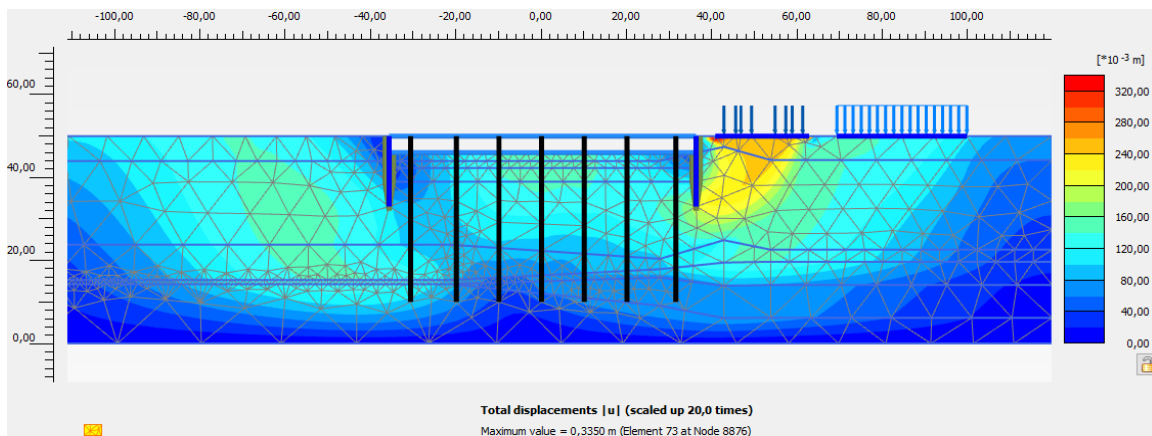
Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

## **B. Anexo: Modelos Plaxis 2D de la excavación**

## B. Anexo: Modelos de deformaciones en Plaxis 2D

A continuación, se presentan los resultados de los análisis geotécnicos realizados para determinar las deformaciones inducidas en el suelo y los elementos circundantes a la excavación del proyecto Green Office.

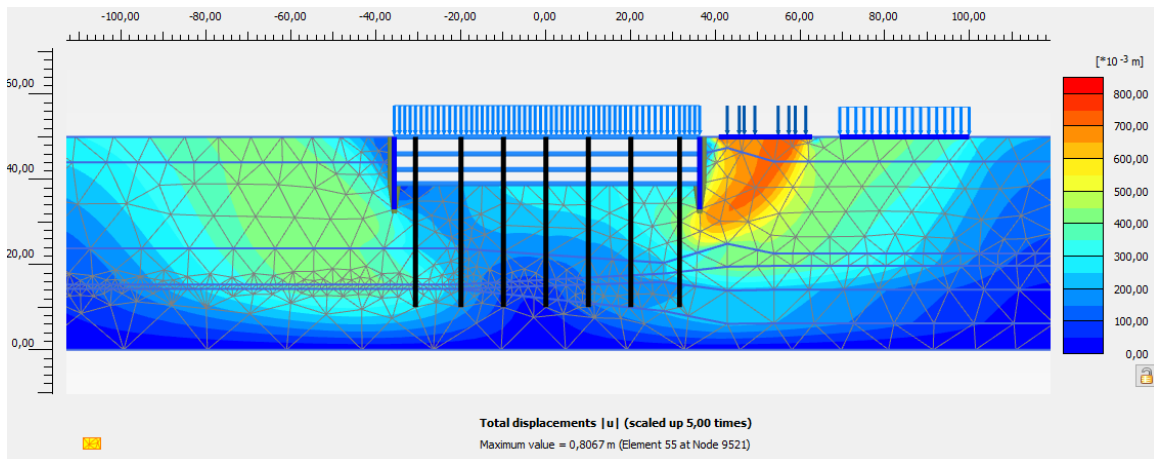
**Figura B - 1:** Sección 1, 5 etapas, profundidad de pantalla 17 m, excavación primer sótano.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

### tercera excavación

Figura B - 2: Sección 1, 5 etapas, profundidad de pantalla 17 m, excavación tercer sótano.

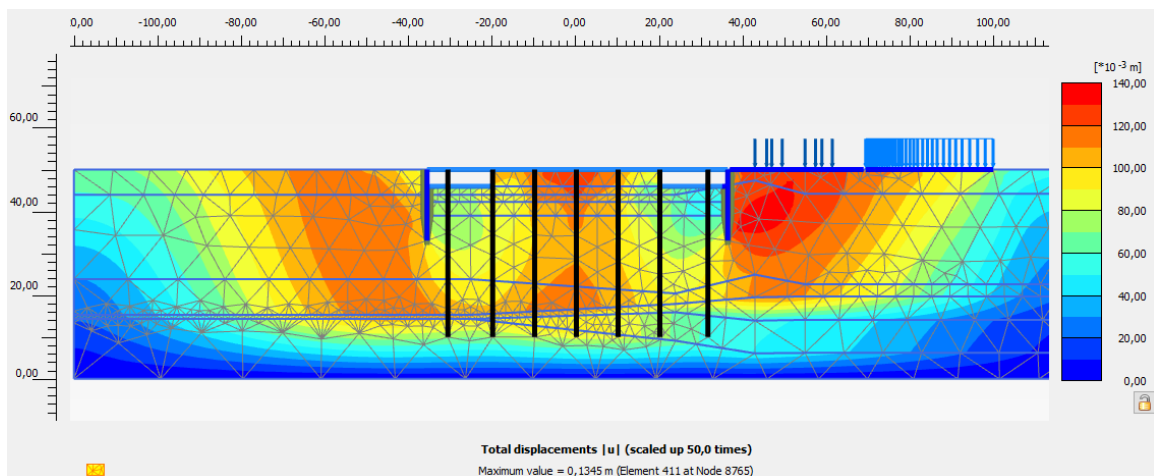


Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

### Sección 1. 8 etapas

#### primera etapa de la primera excavación

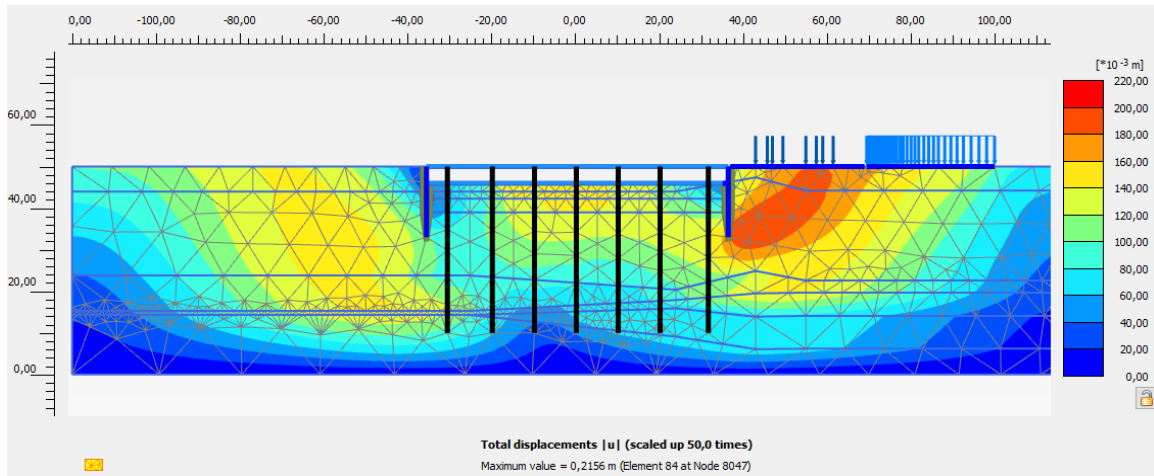
Figura B - 3: Sección 1, 8 etapas, profundidad de pantalla 17 m, primera etapa de la primera excavación.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

### segunda etapa de la primera excavación

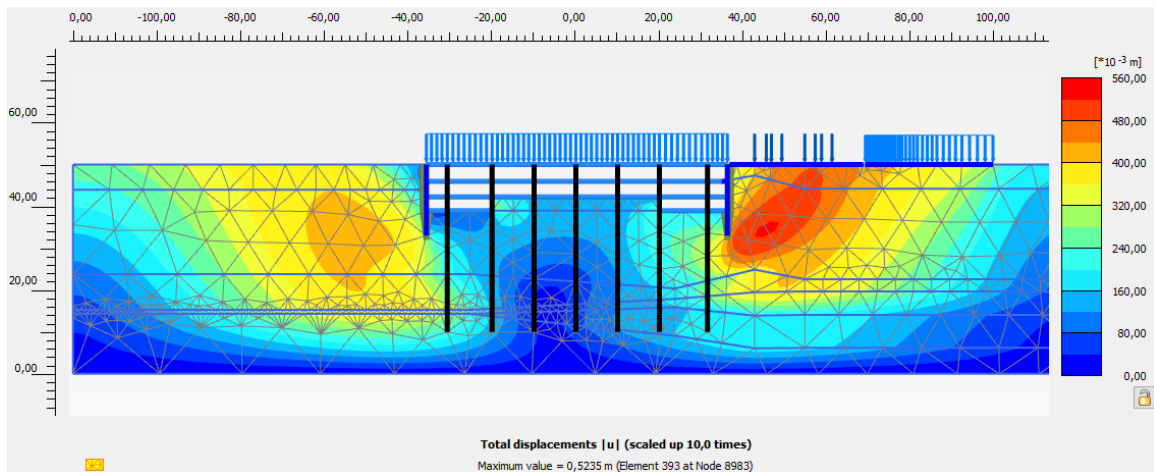
Figura B - 4: Segunda etapa de la primera excavación.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

### primera etapa tercera excavación

Figura B - 5: Primera etapa de la tercera excavación.

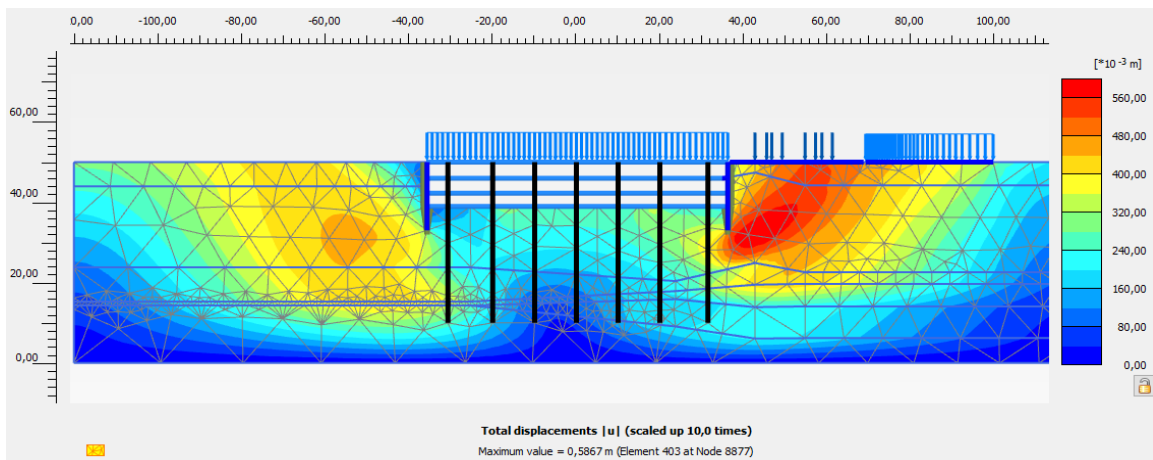


Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.



### segunda etapa tercera excavación

Figura B - 6: Segunda etapa de la tercera excavación.

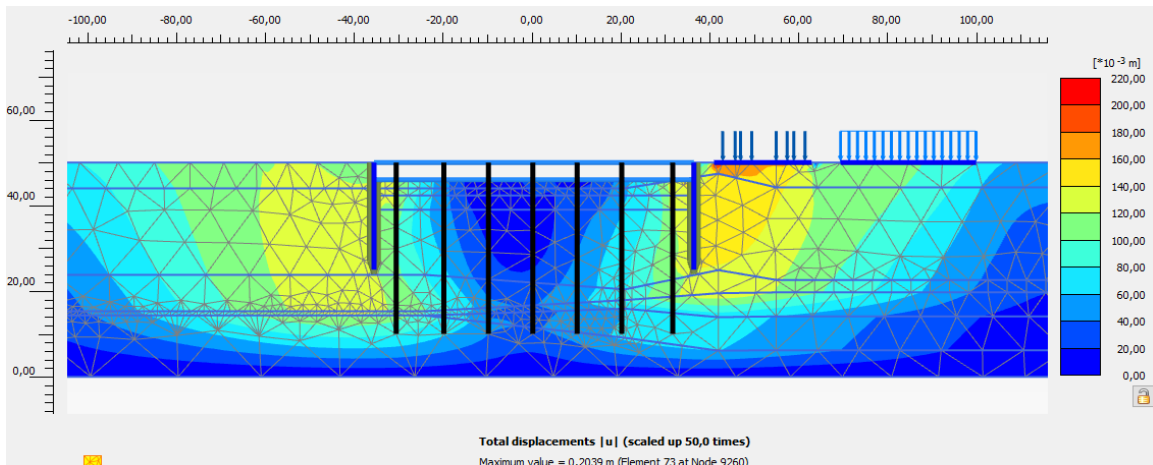


Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

### Sección 1. 5 etapas 25 m

#### primera excavación

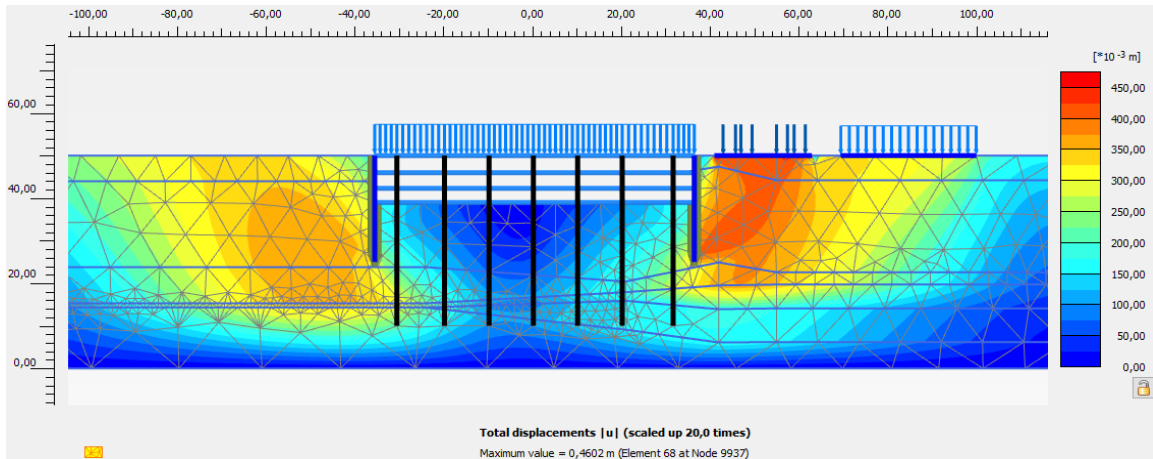
Figura B - 7: Sección 1, 5 etapas, profundidad de pantalla 25 m, primera excavación.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

### tercera excavación

Figura B – 8: Sección 1, 5 etapas, profundidad de pantalla 25 m, tercera excavación.

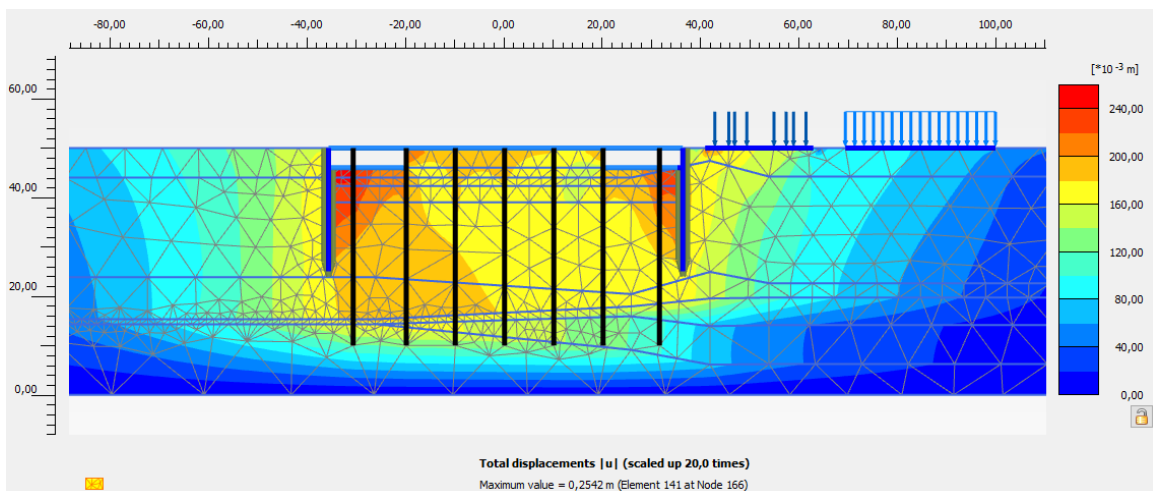


Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

### Sección 1. 8 etapas L=25 m

#### Fase 1 primera excavación

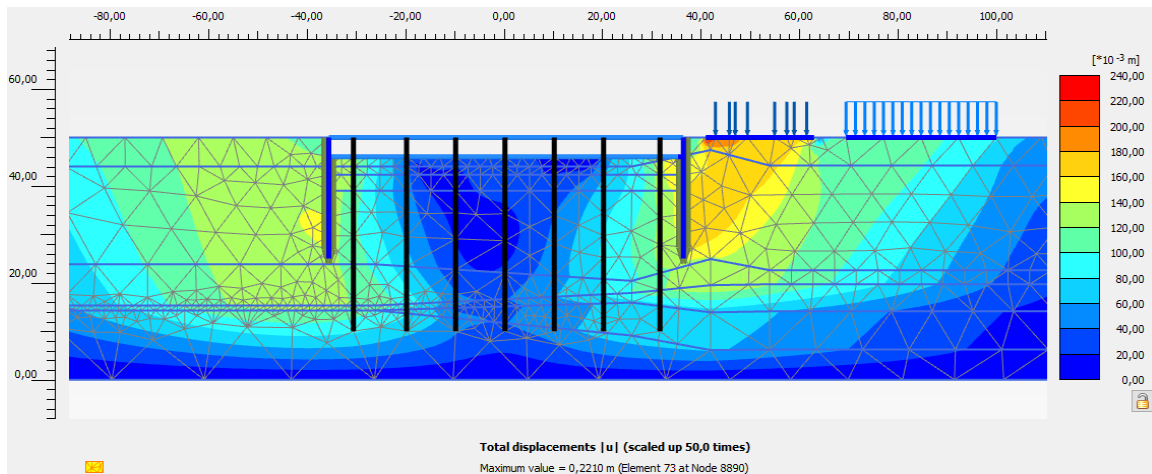
Figura B - 9: Sección 1, 8 etapas, profundidad de pantalla 25 m, fase 1, primera excavación.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

### fase 2 de primera excavación

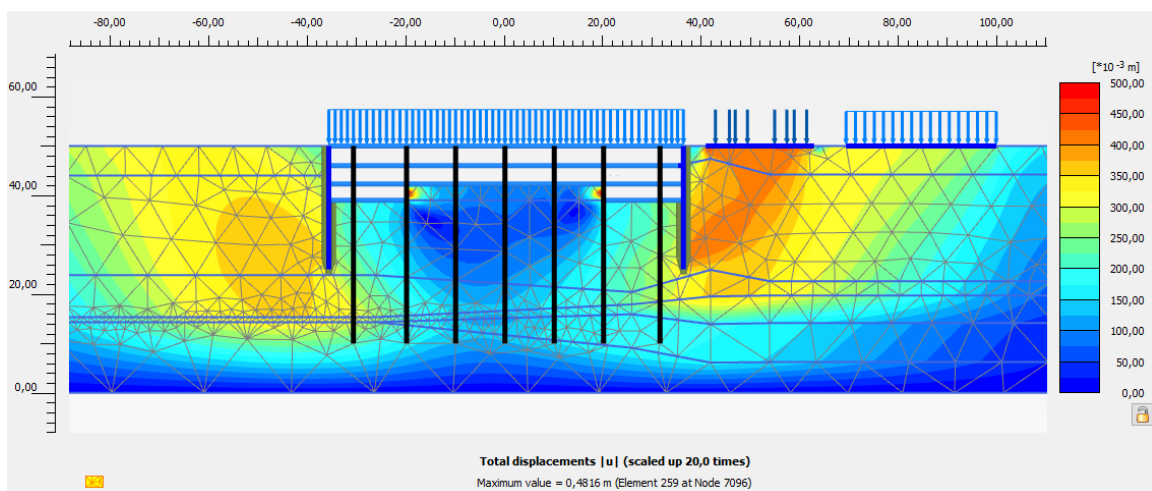
Figura B - 10: fase 2, primera excavación.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

### fase 1, tercera excavación

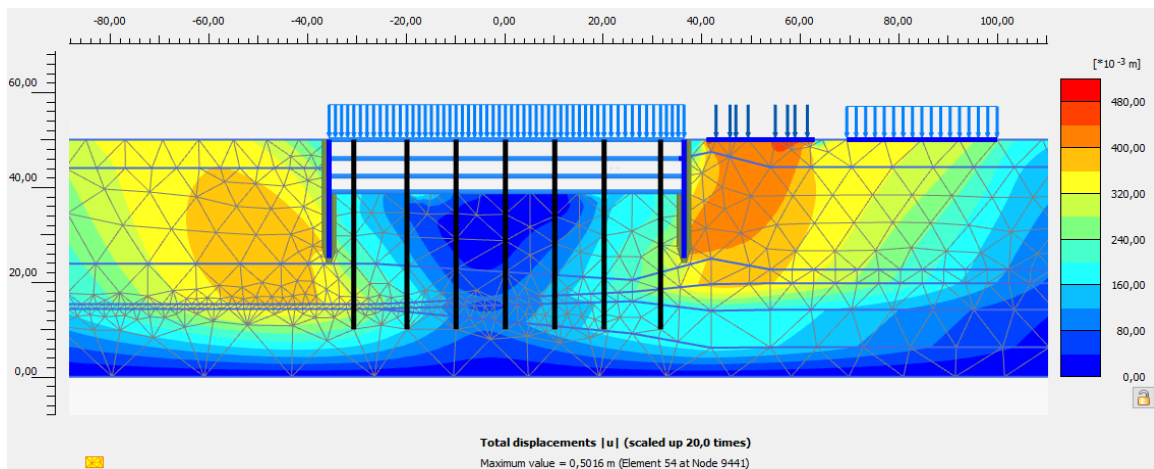
Figura B - 11: fase 1, tercera excavación.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.

## fase 2 tercera excavación

Figura B - 12: fase 2, tercera excavación.



Fuente: Elaboración propia, captura de Software Slide.