



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
*DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO***

**“Cuantificación de las deformaciones volumétricas en  
terraplenes por efecto del clima y su influencia en el  
Índice de Regularidad Internacional”**

Tesis para obtener el grado de  
**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS  
VÍAS TERRESTRES**

Presenta:

**Ing. José Guadalupe Román Gamiño**

Dirigida por:

**Dr. Carlos Chávez Negrete**

Morelia, Michoacán, Diciembre 2021

## RESUMEN

Los terraplenes son acumulaciones importantes de tierra que se tratan y compactan adecuadamente para asegurar la estabilidad y sustentar la estructura del pavimento. Debido a la naturaleza del suelo con el que se construyen, estos llegan a presentar problemas de expansión o colapso al modificar las condiciones iniciales, las cuales están ligadas al peso volumétrico seco y al contenido de agua en que fueron compactados. Dadas las condiciones de compactación en campo, existe una inherente variabilidad en el grado de compactación alcanzado dentro del cuerpo del terraplén. Las deformaciones volumétricas se presentan cuando los terraplenes modifican su contenido de agua, cambiando sus propiedades físico-mecánicas, siendo el aumento en el contenido de agua el más perjudicial para la infraestructura carretera. La modificación en el contenido de agua inicial puede deberse a varios factores, siendo uno de los más relevantes las condiciones ambientales. Por ello, se hizo un estudio de sensibilidad de la variación del grado de compactación dentro del cuerpo del terraplén. Se realizaron un conjunto de modelaciones considerando el variograma para el grado de compactación en un terraplén longitudinal. Se impusieron condiciones atmosféricas en la superficie durante un periodo de 5 años de análisis. El programa utilizado fue el Code Bright, dando como resultado los perfiles de deformación vertical para cada año de estudio. Además, se realizaron los cálculos del Índice Internacional de Regularidad (IRI) observándose su evolución. Dentro de los análisis realizados, se pudo determinar un cambio bajo en el IRI. Con esto pequeño cambio se pueden incrementar los esfuerzos aplicados sobre el pavimento hasta un 25%, que a su vez contribuirá a la aceleración del deterioro de la superficie del pavimento.

### Palabras Clave

Grado de compactación, contenido de agua, Colapso, variograma, IRI.

## ABSTRACT

The embankments are significant accumulations of earth that are adequately treated and compacted to ensure stability and support the pavement structure. Due to the nature of the soil with which they are built, they come to present expansion or collapse problems when modifying the initial conditions, which are linked to the dry volumetric weight and the water content in which they were compacted. Given the compaction conditions in the field, there is inherent variability in the degree of compaction achieved within the embankment body. Volumetric deformations occur when embankments modify their water content, changing their physical-mechanical properties, the increase in water content being the most damaging for the road infrastructure. The modification in the initial water content may be due to several factors, one of the most relevant being environmental conditions. Therefore, a sensitivity study of the variation of the degree of compaction within the body of the embankment was carried out. A set of models in which the variogram for the degree of compaction in a longitudinal embankment was implemented. To which the atmospheric conditions on the surface were set during 5 years of analysis. The Code Bright program was used for the modelling and the vertical deformation profiles for each year of study were obtained. Within the analyzes performed, a change could be determined under the IRI. With this small change, the stresses applied to the pavement can be increased by up to 25%, which once will contribute to the acceleration of the deterioration of the pavement surface.

### Keywords

Degree of compaction, water content, Collapse, variogram, IRI.

## Contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Motivación .....	3
1.2	Objetivo .....	3
1.2.1	Objetivo General.....	3
1.2.2	Objetivo específico. ....	4
2	ANTECEDENTES .....	5
3	MARCO TEÓRICO .....	10
3.1	Terraplenes carreteros .....	10
3.1.1	Proceso de construcción de los terraplenes .....	11
3.1.2	Cambios en el contenido de agua en terraplenes.....	12
3.1.3	Condiciones iniciales .....	18
3.2	Compactación .....	19
3.2.1	Variación espacial del grado de compactación en terraplenes.....	20
3.2.2	Grado de compactación v.s. porosidad .....	24
3.2.3	Implementación del variograma en las porosidades.....	24
3.3	Suelos colapsables .....	29
3.3.1	Mecanismos de colapso .....	29
3.3.2	Deformación plástica de los suelos parcialmente saturados .....	32
3.3.3	Modelo básico de Barcelona .....	36
3.4	Índice de regularidad internacional (IRI).....	42
3.4.1	Calificación del estado de los tramos en función del IRI en México ..	43
3.4.2	Características del modelo cuarto de carro .....	44
3.4.3	Ecuaciones para el cálculo del IRI.....	45
4	METODOLOGÍA .....	48
4.1	Introducción.....	48
4.2	Datos atmosféricos.....	48
4.3	Terraplén bajo condiciones climáticas.....	51
4.3.1	Geometría.....	51
4.3.2	Datos del problema.....	52
4.3.3	Definición de los parámetros del material.....	53

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

4.3.4	Condiciones .....	62
4.3.5	Intervalos de tiempo .....	66
4.3.6	Generación de la malla .....	67
4.4	Generación de la porosidad en base a variogramas .....	68
4.5	Casos de estudio .....	70
4.6	Cálculo del IRI .....	72
4.6.1	Programa para calcular IRI .....	73
4.6.2	Programa de cálculo de coeficientes para las ecuaciones IRI .....	74
4.6.3	Entrada de prueba para verificar el cálculo. ....	75
4.7	Cálculo de esfuerzos aumentados .....	76
5	RESULTADOS .....	78
5.1	Simulaciones con Variante 1 ( $\sigma = 0.35$ MPa) .....	78
5.1.1	Caso 1 (Sin porosidad aleatoria) .....	78
5.1.2	Caso 2 (Long= 16, Esp=0.05) .....	79
5.1.3	Caso 3 (Long= 24, Esp=0.05) .....	81
5.1.4	Caso 4 (Long= 33, Esp=0.05) .....	82
5.1.5	Caso 5 (Long= 41, Esp=0.05) .....	83
5.1.6	Caso 6 (Long= 50, Esp=0.05) .....	84
5.1.7	Caso 7 (Long=50, Esp=0.10) .....	85
5.1.8	Caso 8 (Long= 50, Esp=0.15) .....	86
5.1.9	Caso 9 (Long= 50, Esp=0.20) .....	87
5.1.10	Caso 10 (Long= 50, Esp=0.25) .....	88
5.1.11	Caso 11 (Long= 50, Esp=0.30) .....	89
5.1.12	Evolución del IRI .....	90
5.1.13	Comparativa de los perfiles en el año 5 .....	91
5.1.14	Agrupamiento de casos para la variante 1 .....	95
5.1.15	Análisis de la infiltración para el CASO 6 (El más crítico) .....	97
5.1.16	Aumento de esfuerzos por la irregularidad del pavimento .....	106
5.2	Simulaciones con Variante 2 ( $\sigma = 0.569$ MPa) .....	107
5.2.1	Caso 1 (Sin porosidad aleatoria) .....	107
5.2.2	Caso 2 (Long= 16, Esp=0.05) .....	108

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

5.2.3	Caso 3 (Long= 24, Esp=0.05).....	109
5.2.4	Evolución del IRI.....	110
5.2.5	Comparativa de los perfiles en el año 5.....	111
5.2.6	Agrupamiento de casos para la variante 2 .....	114
5.2.7	Aumento de esfuerzos por la irregularidad del pavimento.....	116
5.3	Comparativa de los casos de estudio más críticos en ambas variantes.	116
5.4	Perfil promedio .....	119
6	CONCLUSIONES .....	120
7	TRABAJOS FUTUROS .....	124
8	BIBLIOGRAFÍA .....	125
9	ANEXOS .....	129
9.1	ANEXO 1.....	129
9.1.1	Programa para la obtención de las porosidades aleatorias .....	129

## Lista de Figuras

Figura 1 a) Datos de lluvia implementada por intervalos b) Evolución de los desplazamientos en la zona superior del terraplén.....	7
Figura 2 Registro de precipitaciones en otoño, 1994 (Alonso, Pinyol, & Puzrin, 2010).....	8
Figura 3 Colapso de terraplenes después de la lluvia (Alonso, Pinyol, & Puzrin, 2010). ....	9
Figura 4 Representación esquemática de un material poroso parcialmente saturado.....	13
Figura 5 Esquema de la Curva de retención con las zonas que la constituyen. ....	17
Figura 6 Curva de compactación típica (Rico & Del Castillo, 1995).....	19
Figura 7 Carta control típica con límites de especificación (M-CAL-1-03/03). ....	21
Figura 8 Histograma de la compactación relativa del proyecto 1 (Sherman, Watkins, & Prysock, 1967).....	22
Figura 9 Histograma de la compactación relativa del proyecto 2 (Sherman, Watkins, & Prysock, 1967).....	23
Figura 10 Histograma de la compactación relativa del proyecto 3 (Sherman, Watkins, & Prysock, 1967).....	23
Figura 11 Elementos del variograma. ....	26
Figura 12 Mapa variográfico (izquierda) y variograma experimental calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas (N60°E y N30°W) (derecha) (Emery, 2013)..	26
Figura 13 Variograma esférico (derecha) y ejemplo de variable regionalizada asociada (izquierda) (Emery, 2013). ....	27
Figura 14 Variograma exponencial (derecha) y ejemplo de variable regionalizada asociada (izquierda) (Emery, 2013). ....	28
Figura 15 Variograma Gaussiano (derecha) y ejemplo de variable regionalizada asociada (izquierda) (Emery, 2013). ....	28
Figura 16 Menisco de agua en el contacto entre dos granos esféricos (Alonso et al., 2010). ....	30
Figura 17 (a) Trayectorias de esfuerzo para carga isotrópica a succión constante; (b) curvas de compresión; (c) puntos de fluencia y curva de fluencia LC (Alonso et al., 2010). ....	33
Figura 18 (a) carga (1- 2) y colapso (1- 3) rutas; (b) respuesta esperada del suelo (Alonso et al., 2010).....	34
Figura 19 Boceto que muestra una interpretación del colapso y la carga en suelos no saturados (Alonso y Gens (1994) © 1994 Taylor and Francis Group).....	35
Figura 20 Variación propuesta de volumen específico con esfuerzo media neta y succión a lo largo de rutas vírgenes y de descarga-recarga (Alonso et al., 1990).....	37

## Quantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Figura 21 Relación entre los esfuerzos de preconsolidación $p_0$ y $p_0^*$ : (a) curvas de compresión para suelos saturados y parcialmente saturados; (b) la trayectoria del esfuerzo y el corte de fluencia en el plano de esfuerzos ( $p, s$ ) (Alonso et al., 1990). .....	38
Figura 22 Curvas de fluencia LC y SI en el espacio ( $p, s$ ). .....	41
Figura 23 Escala original del Banco Mundial para el IRI (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986). .....	43
Figura 24 Esquema del análisis cuarto de carro en términos del modelo mecánico y diagrama de cuerpo libre (Sayers, Gillespie & Queiroz, 1986). .....	44
Figura 25 Precipitación promedia diaria utilizada para la investigación. ....	50
Figura 26 Esquema del Archivo DAT, con los datos climáticos obtenidos para la zona de estudio. ....	50
Figura 27 Topografía del tramo carretero. ....	51
Figura 28 Perfil Longitudinal utilizado en las simulaciones. ....	52
Figura 29 Curvas de retención para diferentes valores de porosidad y su correspondiente grado de compactación. ....	53
Figura 30 Representación gráfica de la aplicación de las condiciones de límite de fuerza / desplazamiento. ....	64
Figura 31 Representación gráfica de la aplicación de las condiciones límite de flujo. ....	66
Figura 32 Detalle del mallado del perfil. ....	67
Figura 33 Mapa variográfico de las porosidades (Escala de la longitud $X=50$ metros, $Y=0.10$ metros). Dimensión de 310 metros en $X$ y 5 metros en $Y$ . ....	69
Figura 34 Programa para el cálculo del IRI en Python. ....	74
Figura 35 Rutina del cálculo de los coeficientes. ....	75
Figura 36 Datos utilizados para la comprobación del programa de cálculo IRI (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986). ....	75
Figura 37 Entrada de perfil especial utilizada para verificar el programa de cálculo IRI. ..	76
Figura 38 Algoritmo para el cálculo de los esfuerzos aumentados a partir del Nuevo perfil. ....	77
Figura 39 Evolución del perfil para la condición sin porosidad aleatoria. ....	79
Figura 40 Evolución del perfil para el caso 2, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	80
Figura 41 Evolución del perfil para el caso 3, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	81
Figura 42 Evolución del perfil para el caso 4, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	83
Figura 43 Evolución del perfil para el caso 5, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	84
Figura 44 Evolución del perfil para el caso 6, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	85
Figura 45 Evolución del perfil para el caso 7, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	86

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Figura 46 Evolución del perfil para el caso 8, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	87
Figura 47 Evolución del perfil para el caso 9, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	88
Figura 48 Evolución del perfil para el caso 10, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	89
Figura 49 Evolución del perfil para el caso 11, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa. ....	90
Figura 50 Perfiles obtenidos al final del tiempo de la simulación (Esfuerzo aplicado de 0.35 MPa).....	93
Figura 51 Vectores de desplazamiento al final de la simulación, Cadenamiento 0+000 al 0+033, CASO 6, variante 1. ....	94
Figura 52 Vectores de desplazamiento al final de la simulación, Cadenamiento 0+270 al 0+307, CASO 6, variante 1. ....	94
Figura 53 Perfiles de deformación con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa a distintas Longitudes en X y un espesor de 0.05 m. ....	96
Figura 54 Perfiles de deformación con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa a distintas Longitudes en Y y una Longitud en X de 50 m. ....	97
Figura 55 Precipitación utilizada para la simulación vs la evolución del grado de saturación en la superficie en diferentes cadenamientos para el CASO 6 (VARIANTE 1).....	98
Figura 56 Perfil del grado de saturación (Sr) para el cadenamiento 0+068.75 (Espesor 4.85 m) del CASO 6 (Variante 1). ....	100
Figura 57 Evolución del grado de saturación para diferentes profundidades en el cadenamiento 0+068.75(Espesor de 4.85 m) para el CASO 6 (VARIANTE 1).....	101
Figura 58 Perfil del grado de saturación (Sr) para el cadenamiento con menor espesor (0+204.5) del CASO 6 (VARIANTE 1).....	102
Figura 59 Evolución del grado de saturación para diferentes profundidades en el cadenamiento 0+204.5 (Espesor de 1.24 m) para el CASO 6 (variante 1). ....	103
Figura 60 Perfil del grado de saturación (Sr) para el cadenamiento 0+250 del CASO 6 (VARIANTE 1). ....	104
Figura 61 Evolución de los desplazamientos verticales vs la evolución del grado de saturación en la superficie en diferentes cadenamientos para el CASO 6 (Variante 1)..	105
Figura 62 Evolución de los desplazamientos verticales vs la evolución de la presión del líquido en la superficie en diferentes cadenamientos para el CASO 6 (variante 1). ....	106
Figura 63 Resumen de esfuerzos aumentados para las simulaciones de la VARIANTE 1. ....	107
Figura 64 Evolución del perfil para la condición sin porosidad aleatoria.....	108
Figura 65 Evolución del perfil para el caso 2, con esfuerzo aplicado de 0.569 MPa. ....	109
Figura 66 Evolución del perfil para el caso 3, con esfuerzo aplicado de 0.569 MPa. ....	110
Figura 67 Perfiles obtenidos al final del tiempo de la simulación (Esfuerzo aplicado de 0.569 MPa).....	112

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Figura 68 Evolución de los desplazamientos verticales vs la evolución de la presión del líquido en la superficie en diferentes cadenamientos para el CASO 2 (variante 2). .....	114
Figura 69 Perfiles de deformación con esfuerzo aplicado de 0.569 MPa a distintas Longitudes en X y un espesor de 0.05 m. ....	114
Figura 70 Perfiles de deformación con esfuerzo aplicado de 0.569 MPa a distintas Longitudes en Y y una Longitud en X de 50 m. ....	115
Figura 71 Resumen de esfuerzos aumentados para las simulaciones de la variante 2..	116
Figura 72 Comparación del Caso 1 para ambas variantes. ....	117
Figura 73 Comparación del CASO 6 para ambas variantes. ....	118
Figura 74 Comparación del CASO 5 para ambas variantes. ....	118
Figura 75 Perfil promedio de todas las simulaciones de las 2 variantes. ....	119

## 1 INTRODUCCIÓN

El transporte por carretera es el de mayor contribución a la actividad nacional, por lo que es necesario que el transporte opere con base a parámetros de eficiencia. Las carreteras tienen por objetivo permitir la circulación rápida, económica, segura y cómoda, de vehículos sujetos al control de un conductor. En la infraestructura carretera los terraplenes son un elemento primordial al cual se le ha tomado poca relevancia en relación con estos parámetros.

En la actualidad, el estudio del comportamiento de los terraplenes en México es poco o está prácticamente abandonado, aun siendo estos una parte muy importante de la infraestructura carretera, ya que los terraplenes son la primera capa sobre la cual se desplantan, y están directamente relacionados con la funcionalidad y la adecuada operación de las carreteras.

Debido a la naturaleza del suelo con el que se construyen los terraplenes, estos llegan a presentar problemas de expansión o colapso al modificar sus condiciones iniciales. Las condiciones iniciales que determinan el comportamiento del terraplén durante su vida útil están ligadas a su peso volumétrico seco y contenido de agua inicial; que mediante el proceso de compactación se buscan que sean las óptimas, con relación a la prueba Proctor (AASHTO) estándar. Pero el hecho de tener condiciones iniciales adecuadas en el terraplén no implica que estas se mantengan a lo largo de su vida útil, pues la infraestructura carretera generalmente se encuentra expuesta ante las condiciones climatológicas cambiantes, que modifican su comportamiento y generan deformaciones volumétricas.

Las deformaciones volumétricas se presentan cuando los suelos de los terraplenes compactados modifican su contenido de agua o humedad (por infiltraciones, cambios climáticos, elevación del Nivel freático, etc.), cambiando sus propiedades físico-mecánicas, siendo el aumento en el contenido de agua el más perjudicial para la infraestructura carretera, ocasionando asentamientos (colapso), cambios en la sección del camino, protuberancias (expansión), agrietamientos, etc., que generan costos de mantenimiento adicionales y afectan la adecuada operatividad de la vía.

Aunado a los cambios climatológicos, la norma N-CMT-1-01/02 en México, establece que el grado de compactación para el terraplén es del  $90 \% \pm 2$ , que, de acuerdo con estudios previos, se ha demostrado que es un grado de compactación bajo, pues se han observado grandes deformaciones volumétricas cuando se tienen estos grados de compactación (Chávez, Espinosa, Alarcón & Arreygue, 2016).

Además, es necesario considerar la variabilidad del grado de compactación que existe en el cuerpo del terraplén, pues debido a los materiales utilizados y el proceso constructivo, pueden presentar diferencias significativas de un punto a otro, obteniendo diferentes valores en el grado de compactación dentro de la misma capa del terraplén, lo que conlleva a diferentes características físico-mecánicas del suelo. Esta variabilidad del grado de compactación dentro del cuerpo del terraplén ha sido un tema de poco estudio en México.

Para realizar los análisis tan complejos que engloban todo lo anterior, se han desarrollado diversos modelos numéricos que permiten evaluar el comportamiento de los terraplenes desde el marco conceptual coherente que proporciona la mecánica de suelos parcialmente saturados. Un aspecto fundamental, es la disponibilidad de datos de un caso real debidamente instrumentado, que proporciona la información necesaria para la verificación y validación de los modelos, así como los materiales necesarios para el estudio experimental.

En este trabajo de investigación, se realizó una recopilación de la información climatológica y del material utilizado en la zona ubicada sobre la autopista Pátzcuaro–Uruapan, Michoacán, México, el cual es un limo de alta compresibilidad. Con esta información se realizaron diversos modelos numéricos en el programa Code Bright, para la obtención de las deformaciones verticales a lo largo de un perfil, en el cual se contemplaron las variaciones climatológicas durante un periodo de 5 años. Esto con el fin de observar la influencia de las condiciones ambientales sobre los terraplenes y por ende en la superficie de los pavimentos, por medio de la modificación en el Índice de regularidad internacional (IRI).

## 1.1 Motivación

Los terraplenes son un elemento vital dentro de la infraestructura carretera, debido a las características que posee, siendo algunas de estas, ser la primera capa de mejoramiento en las carreteras, dado que se encuentra desplantada sobre el terreno natural; servir de desplante de la estructura del pavimento, ofreciéndole estabilidad; puede ser la capa con mayor volumen de material. Por tal motivo, es pertinente realizar estudios sobre su comportamiento a lo largo de su vida útil, incluyendo las variables climáticas, que afectan o modifican su comportamiento estructural esperado.

Los modelos numéricos que existen en la actualidad, como lo es el programa Code Bright, nos permiten realizar simulaciones en las cuales se consideran las variables climáticas. Con los cuales podemos analizar el comportamiento de un terraplén para un periodo de análisis y así, poder tomar las medidas pertinentes para mitigar o minimizar las deformaciones volumétricas resultantes. Lo que conllevaría a una mayor duración en el confort, la seguridad y la correcta operatividad de la vía y asimismo la disminución de los costos de mantenimiento del pavimento de la carretera.

## 1.2 Objetivo

### 1.2.1 Objetivo General.

Cuantificar las deformaciones verticales de la superficie de un pavimento debidas a la deformación volumétrica de un terraplén, por efectos de las condiciones atmosféricas para verificar el cambio del Índice de Regularidad Internacional (IRI).

1.2.2 Objetivo específico.

Seleccionar las propiedades mecánicas del suelo del terraplén y su variabilidad, para establecer las condiciones iniciales del modelo de elementos finitos en Code Bright a partir de estudios existentes.

Modelar el terraplén compactado en el tiempo para obtener sus deformaciones volumétricas considerando las siguientes etapas:

- La recopilación de los datos climatológicos
- La conformación del Modelo numérico en Code Bright para estudiar el fenómeno.
- El estudio de sensibilidad en secciones longitudinales del cuerpo del terraplén considerando variogramas de las porosidades para verificar el cambio de IRI.

## 2 ANTECEDENTES

El comportamiento de los suelos parcialmente saturados, cuando estos se ven sometidos a cambios en su contenido de agua, ha sido tema de estudio durante los últimos años debido a la gran importancia de estos en las obras ingenieriles. Una herramienta útil para modelar y simular el comportamiento de los suelos parcialmente saturados es el software Code Bright, que es un programa de Método de Elementos Finitos (FEM) capaz de realizar análisis termo-hidro-mecánicos (THM) acoplados en medios geológicos.

Code Bright utiliza el sistema GiD para preprocesamiento y posprocesamiento. GiD es desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). GiD es una interfaz gráfica de usuario interactiva que se utiliza para la definición, preparación y visualización de todos los datos relacionados con las simulaciones numéricas. Estos datos incluyen la definición de la geometría, materiales, condiciones, información de la solución y otros parámetros.

Existen diversos casos de estudio documentados donde se analiza el comportamiento de los suelos parcialmente saturados cuando estos se ven sometidos a variaciones en su contenido de agua.

García (2012) realizó un análisis de los cambios del contenido de agua que se produjeron en un terraplén en su construcción y en el inicio de su operación, el cual tiene una altura de 26 m. Este análisis se efectuó mediante la comparación de los resultados obtenidos por una modelación numérica acoplada termo-hidráulica y termo-hidro-mecánica en Code Bright, que incluyó los procesos de interacción suelo-atmósfera con las medidas realizadas in-situ, para un periodo de 3 años y medio.

La interpretación de los resultados obtenidos de la simulación y las medidas in-situ, evidenció varios mecanismos de control de la evolución de los contenidos de agua:

- Las fluctuaciones de succión obedecen a dos mecanismos superpuestos: a) la evolución del patrón de succión desde el estado inicial de compactación

hacia el estado estacionario y b) las fluctuaciones provocadas por la condición atmosférica.

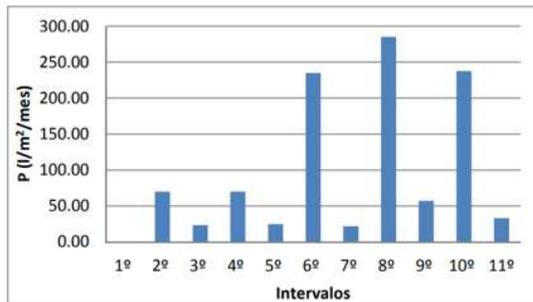
- Las fluctuaciones de las variables de control: presión de agua, temperatura, flujos de agua líquida y concentración de vapor, mostraron en general una buena relación con los procesos que se esperan en los distintos periodos estacionales del año, marcando con claridad los ciclos estacionales.
- En profundidad, estas fluctuaciones se atenúan y se desfasan en el tiempo, al punto de existir el núcleo del terraplén en su estado más frío a mitad de primavera y más caliente a mitad de otoño.
- La distribución de concentración de vapor, regida tanto por la succión como por la temperatura de acuerdo con la ley psicrométrica, tiene un patrón mixto entre el de succión y temperatura, evidenciando una atenuación respecto al de temperatura por efecto de gravedad.
- Los mayores cambios en el contenido de agua ocurrían cerca de la interfase suelo – atmosfera, en la zona activa, la cual para este caso se encontró entre 1 y 1.50 m, apreciándose la variación del potencial de agua de valores negativos altos durante periodos secos, a valores más bajos en periodos de mayor humedad.
- En el caso estudiado, la deformación del terraplén no afecta los cambios hídricos.

Otro caso de estudio del comportamiento de suelos parcialmente saturados mediante simulaciones en Code Bright, es el realizado por Oscoz (2016). En el cual analizan los cambios hídricos mediante un modelo acoplado termo-hidráulico, basado en los datos proporcionados de un experimento realizado en Escocia sobre un terraplén a escala. El objetivo de la investigación era conseguir una relación entre los diferentes parámetros climáticos y del suelo y, la respuesta de la estructura. Para ello se analiza la respuesta del modelo ante variaciones de la radiación, permeabilidad, calor específico y la curva de retención del suelo. En este trabajo se concluyó que la evaporación del agua la controla la radiación mientras que la infiltración del agua en el suelo viene controlada por la permeabilidad. El calor específico del suelo tiene muy poca repercusión. La conclusión más importante es

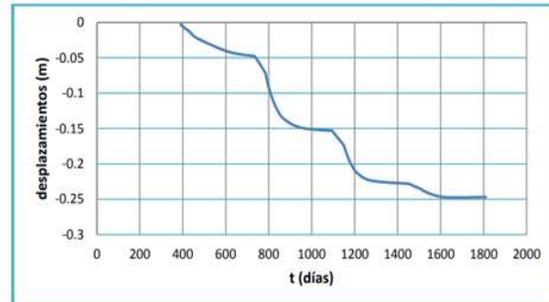
## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

que la ley que controla en mayor medida el proceso es la curva de retención, que ajustándola debidamente permite conocer perfectamente la reacción del suelo (succión) ante los cambios de humedad.

En la investigación realizada por Belloso (2012), en la cual se utilizó el programa Code Bright, se analiza, el caso de un terraplén tipo, basado en un estudio realizado sobre un terraplén de 40 metros de altura que forma parte de la conexión ferroviaria de alta velocidad entre Madrid y Sevilla, reproduciendo el episodio de lluvias (por intervalos) sucedido entre los años 1993 y 1998 (Figura 1a). El objetivo del trabajo consistió en la modelación de un terraplén mediante un modelo acoplado flujo-deformación (hidro-mecánico) para suelos parcialmente saturados, en el que por efecto de la lluvia se produce aumento en el contenido de agua y el consiguiente colapso. En la Figura 1b se muestran los resultados de los colapsos en el terraplén producidos por las lluvias, pues el terreno al comenzar a saturarse, las partículas comienzan a perder cohesión entre ellas produciendo una reestructuración de estas traduciéndose en una reducción en el volumen.



(a)



(b)

Figura 1 a) Datos de lluvia implementada por intervalos b) Evolución de los desplazamientos en la zona superior del terraplén.

Además, se analizan los parámetros del material que más incidencia tienen en la generación de asientos producidos por el colapso del terraplén. La variación en la permeabilidad tiene una incidencia relevante en el comportamiento del suelo, al aumentar la permeabilidad, las deformaciones son menores. La variación en el módulo elástico no demostró relevancia para el estudio. Por otro lado, el grado de compactación tiene mucha importancia, ya que, al ser mayor, se tienen menos desplazamientos volumétricos. La curva de retención es otro parámetro importante,

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

ya que, al aumentarla, los desplazamientos son menores. Por último, el estudio del efecto de las lluvias a largo plazo demuestra que los asentamientos más significativos ocurren en los primeros años.

Un caso real de colapso producido por la precipitación fue el provocado en una carretera nueva de la provincia de Girona, en España. La pérdida de volumen experimentada por el suelo compactado como resultado de fuertes lluvias resultó en asentamientos generalizados que alcanzaron los 30 cm en algunos lugares. La precipitación acumulada en un período de 38 días alcanzó los 374 l/m<sup>2</sup>. Las intensidades más altas se midieron el 10 y 11 de octubre de 1994 (123 y 56 l/m<sup>2</sup>, respectivamente, Figura 2) (Alonso, Pinyol, & Puzrin, 2010).

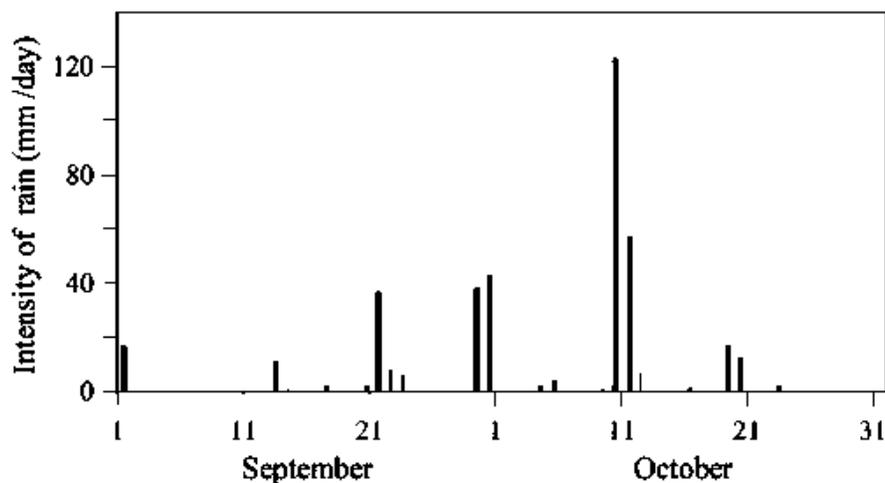


Figura 2 Registro de precipitaciones en otoño, 1994 (Alonso, Pinyol, & Puzrin, 2010).

En la Figura 3 se muestran los colapsos en el terraplén de acceso de un puente. El relleno en contacto con el pilar del puente no solo se asentó (la posición original del relleno se muestra en el muro de concreto) sino que también se retrajo horizontalmente, dejando un espacio amplio y vacío que luego se llenó con una mezcla de asfalto (la banda negra adyacente a la pared del pilar en la fotografía).

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

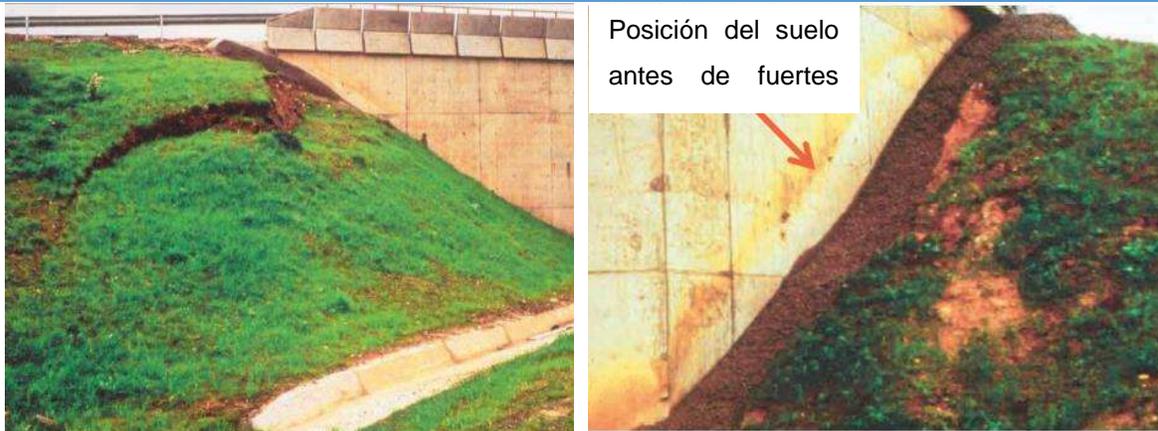


Figura 3 Colapso de terraplenes después de la lluvia (Alonso, Pinyol, & Puzrin, 2010).

El trabajo realizado por Chávez, Espinosa, Alarcón & Arreygue, (2016), se estudia el comportamiento mecánico de un limo compactado característico de la región nororiente del estado de Michoacán, para explicar las deformaciones en algunos de los terraplenes de la autopista Pátzcuaro-Uruapan. Se realiza un análisis aplicado a un terraplén representativo de la autopista Pátzcuaro-Uruapan, en el que se cuantifica la infiltración del agua en el tiempo y se utiliza el Modelo Básico de Barcelona (BBM) para el cálculo de las deformaciones de colapso.

Para realizar la simulación del cálculo de los asentamientos de colapso, se hizo un análisis en dos partes: la primera el cálculo de la infiltración del agua, (se abordó de dos maneras, con flujo estable y con flujo transitorio), la segunda involucró el cálculo de los asentamientos en el tiempo que se tienen a medida que se presenta la infiltración del agua. Para simplificaciones del problema, se solucionó como eventos separados. Además, la infiltración se considera continua en el tiempo (2 años, 8 meses con 26 días)

Se concluyó que las deformaciones obtenidas son significativas, pero dependen fuertemente del tiempo de infiltración y las condiciones de contorno. La infiltración propuesta fue constante en el tiempo, pero debido a que en la realidad no se presenta esta situación, las deformaciones obtenidas se presentarán en un tiempo mayor.

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Terraplenes carreteros

Un pavimento puede definirse como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendida(s) entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento. Sus principales funciones son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito (Rico & del Castillo, 1978).

Los terraplenes son grandes estructuras de tierra adecuadamente tratadas y compactadas para asegurar su estabilidad y servir de soporte al pavimento; se construyen generalmente en terrenos montañosos, lomeríos y en planos, cuando en estos últimos necesitan conservar o modificar su pendiente; están compuestos de suelos o fragmentos de roca, producto de cortes o acarreos de bancos de materiales.

El comportamiento de los terraplenes como material de apoyo para la estructura del pavimento ha sido objeto de relativamente poco estudio. Rico & del Castillo (1978) citaron 2 conclusiones válidas a partir de estudios experimentales:

1. La resistencia al esfuerzo cortante no es un requisito fundamental, ya que los niveles de esfuerzos que a ellas llegan a través de todo el espesor protector que constituye el pavimento, quedan siempre por debajo de la capacidad de carga a la falla.
2. Por lo que la deformación parece ser el requisito básico para la aceptación o rechazo de un material de terraplén y también el que condiciona su buen comportamiento como soporte del pavimento.

Dado la naturaleza de los materiales con los que se construyen los terraplenes carreteros, estos llegan a presentar fenómenos de expansión o colapso, debido a que se trata de suelos parcialmente saturados, donde su comportamiento

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

volumétrico está estrechamente relacionado con la variación en el grado de saturación.

En la siguiente tabla se muestran los requisitos de calidad de los materiales que se utilizan en la construcción de terraplenes (N-CMT-1-01/16).

Tabla 1 Requisitos de calidad de materiales para terraplén

Característica	Valor
Límite líquido; %, máximo	50
Valor Soporte de California (CBR) <sup>[1]</sup> ; %, mínimo	5
Expansión; %, máxima	5
Grado de compactación <sup>[2]</sup> ; %	90 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al óptimo de compactación.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa. Cuando el material sea no compactable, de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*, el tamaño máximo será de 75 cm, se colocará en capas del espesor mínimo que permita el máximo tamaño del material que se emplee y se bandeará, previa aplicación de un riego de agua a razón de 150 L/m<sup>3</sup>, dando como mínimo tres pasadas en toda la superficie en cada capa con un tractor de 36.7 t con orugas.

### 3.1.1 Proceso de construcción de los terraplenes

Gran parte de la problemática de los terraplenes está relacionada con el proceso constructivo y todo lo que ello conlleva, resaltando las condiciones de compactación y el contenido de agua con los que se construyen. Dentro del laboratorio, se definen las características de compactación del material por medio de pruebas, que tendrán que ser representativas de las condiciones que se tendrán en campo, ya que, de no ser así, puede que el comportamiento del terraplén sea inadecuado, generando fallas en la estructura del pavimento.

El proceso constructivo de terraplenes en México consiste en extender el material en capas sucesivas sensiblemente horizontales en todo el ancho del terraplén, siempre que la topografía del terreno lo permita. El material se prepara previamente hasta alcanzar el contenido de agua de compactación que indique el proyecto, extendiéndolo parcialmente e incorporándole el agua necesaria para la compactación, por medio de riegos y mezclados sucesivos, o eliminando el agua excedente.

El contenido de agua es uno de los parámetros de los cuales es más difícil tener control, principalmente debido a las condiciones climáticas, que llevan a realizar compactaciones con contenido de agua mayores a los especificados, lo que puede generar comportamientos no deseados en el terraplén.

Como se mencionó anteriormente, el material utilizado para la construcción será proveniente de cortes o bancos, que se descarga sobre la superficie donde se extenderá, en cantidad prefijada por estación de veinte (20) metros.

El espesor del material extendido, no será mayor que aquel que el equipo sea capaz de compactar al grado indicado en el proyecto, y se conformará de tal manera que se obtenga una capa de material sin compactar de espesor uniforme. Después se compactará hasta alcanzar el grado indicado en el proyecto. La compactación se hace longitudinalmente, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada (N-CTR-CAR-1-01-009/16).

Aunque el proceso de compactación se realice de manera adecuada, es inevitable que se presenten variaciones en las características de compactación dentro del cuerpo del terraplén. En el apartado 3.2 se aborda este tema.

### 3.1.2 Cambios en el contenido de agua en terraplenes.

La variación en el contenido de agua en los terraplenes o terrenos naturales tiende a ser un fenómeno complejo, controlado por muchos factores. Un principio acertado de proyecto en todos los casos sería eliminar o minimizar la variación de humedad a partir del momento de la construcción. De esta forma se evitarían los cambios

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

volumétricos y las variaciones en la rigidez y resiliencia inicial, que idealmente deben corresponder a las condiciones de proyecto (Zepeda, 2004).

Los cambios en la humedad y temperatura dentro del cuerpo de los terraplenes debidas a las condiciones ambientales modifican las condiciones iniciales, que producen deformaciones en los materiales compactados y cambian la rigidez, comportamiento bajo cargas cíclicas y resistencia. Todo ello afecta el comportamiento del pavimento.

### 3.1.2.1 Interacciones en el medio poroso

Se considera un medio poroso compuesto por granos sólidos, agua y gas. Se tendrán en cuenta aspectos térmicos, hidráulicos y mecánicos, incluido el acoplamiento entre ellos en todas las direcciones posibles. Como se ilustra en la Figura 4, el problema se formula en un enfoque multifase y multiespecie.

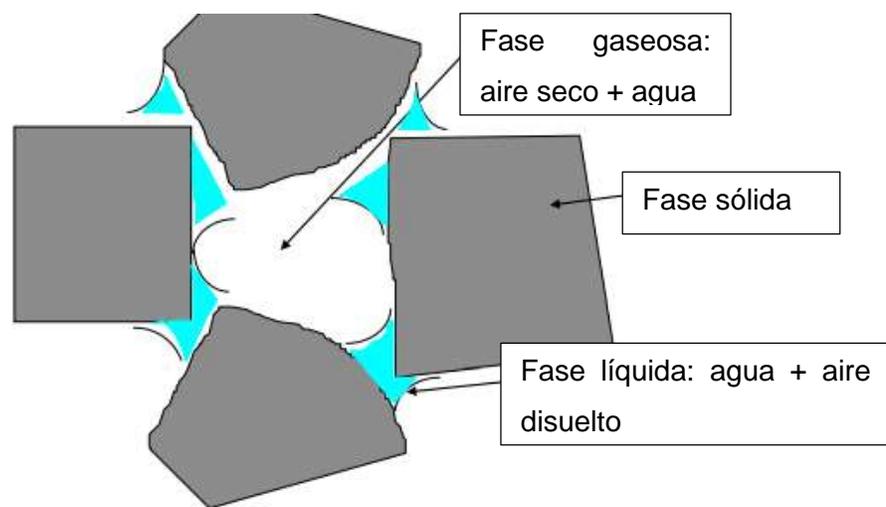


Figura 4 Representación esquemática de un material poroso parcialmente saturado.

Las tres fases son:

- fase (s) sólida (s): mineral
- fase líquida (l): agua + aire disuelto
- fase gaseosa (g): mezcla de aire seco y vapor de agua

Las tres especies son:

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

- sólido (-): el mineral coincide con la fase sólida
- agua (w): líquida o evaporada en fase gaseosa
- aire (a): aire seco, en forma de gas o disuelto en la fase líquida

Los medios porosos, como es el caso de los terraplenes, se encuentran sometidos a condiciones térmicas, hidráulicas y mecánicas, que producen fenómenos termo-hidro-mecánicos (THM) relevantes. De hecho, existen una serie de interacciones mutuas que deben tenerse en cuenta simultáneamente en los análisis. Por ejemplo, los esfuerzos debidos a la carga térmica inducirán variaciones de esfuerzo y cambios en términos de almacenamiento masivo y conductividad hidráulica. La expansión térmica del agua en los propios poros provoca cambios en el grado de saturación o, si el material está saturado o casi saturado, aumentos de la presión del agua. La difusión de vapor inducida térmicamente y la dependencia de la viscosidad del agua con la temperatura también afectan significativamente el proceso de transferencia de agua.

Por otro lado, los cambios en las condiciones hidráulicas influyen en el campo de temperatura a través de variaciones de conductividad térmica y afectan el campo de esfuerzo/deformación debido a los cambios de presión de agua de poro y de gas de poro. La presión del gas se ve afectada por el aumento de la presión de vapor con la temperatura. Esto puede provocar más cambios en el patrón de flujo de gas y agua. Finalmente, los cambios de porosidad debidos a la deformación volumétrica influyen en las distribuciones de la presión intersticial debido a las variaciones asociadas en términos de almacenamiento y conductividad hidráulica. El efecto sobre la temperatura es menos importante ya que las variaciones de conductividad térmica con la porosidad son relativamente pequeñas.

Los procesos de cambio mencionados están fuertemente acoplados y por ello es conveniente que los modelos de predicción utilicen una formulación conjunta de los fenómenos de transporte (agua, calor) y deformación. Por otra parte, los terraplenes están en condiciones no saturadas. La saturación es una condición límite que con frecuencia no se alcanza. Por ello, es necesario plantear, con suficiente generalidad,

las condiciones de transferencia de agua (líquida y vapor), aire y temperatura y las de equilibrio mecánico en suelos parcialmente saturados (Zepeda, 2004).

### 3.1.2.2 *Succión en suelos parcialmente saturados*

El término “succión del suelo” fue usado por Schofield, (1935) para representar la “deficiencia de presión” en el agua de poros de algunos suelos (saturados o no saturados) que tenían la capacidad de absorber agua si se le adicionaba agua a la presión atmosférica. El término succión o potencial de agua designa a la integrante del estado de esfuerzo, que tiene en cuenta aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructural de un suelo. Sin su participación resulta imposible definir el estado de esfuerzo y entender la respuesta deformacional de un suelo parcialmente saturado (Barrera, & Garnica, 2002).

La succión total se define por la suma de la succión matricial y la succión osmótica:

$$s = s_m + s_o \quad \text{Ecuación 1}$$

La diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros se define como la succión matricial ( $s_m = u_a - u_w$ ). El valor de esta succión matricial depende de la tensión superficial y el radio de curvatura del menisco. Cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños donde el radio de curvatura del menisco se reduce, y de esta manera, la succión matricial se incrementa. Debido a los poros pequeños, se desarrollan succiones matriciales más altas en suelos arcillosos más que en los suelos granulares.

La succión Osmótica ( $s_o$ ) se define como la presión negativa a la cual debe someterse el agua químicamente pura, para que esté en equilibrio, a través de una membrana semipermeable, con el agua del suelo. Esta componente depende de la presencia de sales disueltas en el agua del suelo y no depende de la sobrecarga.

Evidencias experimentales sugieren que la resistencia al corte y el comportamiento del cambio de volumen de suelos no saturados son dependientes de la succión matricial más que de la succión total (Alonso et al. 1987). De esta manera, el

comportamiento de esfuerzo–deformación depende de la succión matricial mientras que el flujo de agua depende del gradiente de la succión total (más efectos gravitacionales).

### 3.1.2.3 Curva de retención de agua

El flujo a través de terraplenes depende en gran medida de la permeabilidad del material de relleno, que a su vez depende de la permeabilidad relativa y saturada. El último es el valor de permeabilidad parcialmente saturada normalizado al primero (que es el valor máximo de permeabilidad en saturación) y se expresa en función de la succión o el grado de saturación (Le, Gallipoli, Sanchez & Wheeler 2012).

Se denomina Curva Característica o Curva de Retención de un suelo, a la relación entre la succión impuesta y la humedad de equilibrio. Así, la humedad de equilibrio de un suelo parcialmente saturado depende de la succión que se presenta bajo ciertas condiciones ambientales en el entorno y de las propiedades del suelo.

La curva de retención de agua de van Genuchten se utiliza para calcular el grado efectivo de saturación ( $S_e$ ) de la succión del suelo, es decir, a partir de la diferencia entre la presión de aire de poro ( $u_a$ ) y la presión de agua de poro ( $u_l$ ), de acuerdo con la siguiente ecuación (Genuchten, 1980):

$$S_e = \frac{S_l - S_r}{S_s - S_r} = \left( 1 + \left( \frac{u_a - u_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $S_l$ ,  $S_s$  y  $S_r$  son los valores actuales, máximos y residuales del grado de saturación respectivamente y  $\lambda$  es un parámetro del modelo que dicta la forma de la curva de retención.

$$P = P_0 \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

- $P_0$  (MPa) = Es la medición de  $P$  a cierta temperatura

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

- $\sigma_0$  ( $\text{N m}^{-1}$ ) = Tensión superficial a la cual  $P_0$  fue medida (usualmente  $\sigma_0=0.072$  N/m a  $20^\circ\text{C}$ )
- $\sigma = 0.03059 \exp(252.93/(273.15 + T)) =$  Tensión superficial (N/m) temperatura en Grados Celsius.

Varios estudios experimentales (Vanapalli, Fredlund & Pufahl, 1999; Romero E, Vaunat, 2000; Jacinto & Villar, Gómez & Ledesma, 2009) han demostrado que el parámetro  $P$  en la Ecuación 2 depende de la porosidad  $\phi$ . En particular, en este trabajo se ha adoptado la siguiente relación entre  $P_0$  y  $\phi$ :

$$P_0(\phi) = P_0 \exp(a(\phi_0 - \phi)) \quad \text{Ecuación 4}$$

El parámetro  $a$  en la Ecuación 4 controla la tasa a la que el valor de  $P_0$  cambia cuando  $\phi$  se desvía de  $\phi_0$ , con valores más grandes de  $a$  produciendo cambios más grandes de  $P_0$  para la misma variación de  $\phi$ .

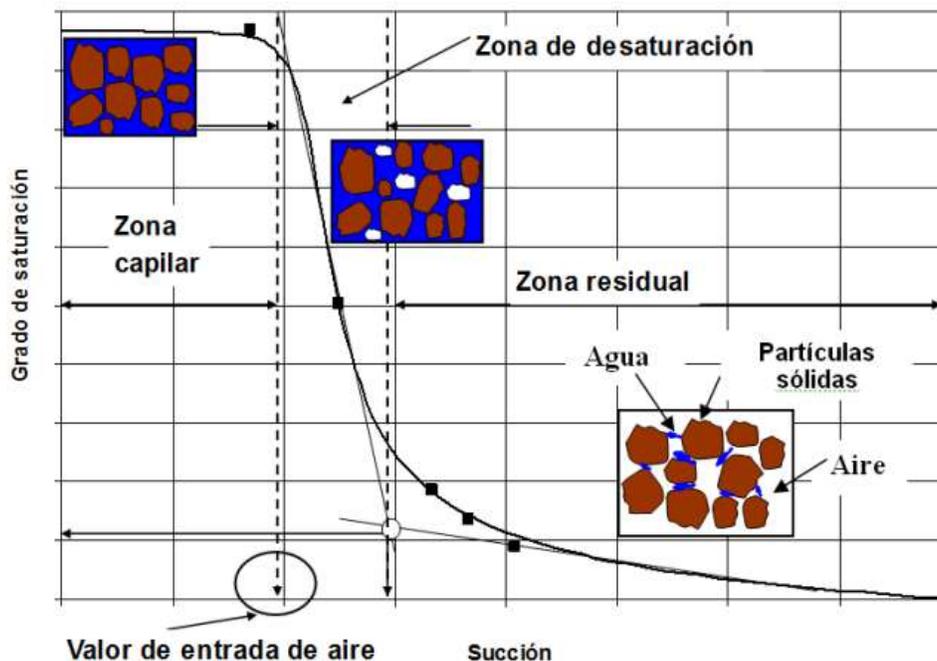


Figura 5 Esquema de la Curva de retención con las zonas que la constituyen.

### 3.1.3 Condiciones iniciales

El estado inicial de los terraplenes está controlado, para un material dado, por las condiciones de compactación. En un material granular el estado inicial se puede caracterizar por el peso específico seco, el contenido de agua alcanzado y por el estado inicial de esfuerzos. Todas estas “variables de estado” definen las propiedades iniciales de las capas de apoyo del pavimento: permeabilidad, deformabilidad y condiciones de rotura.

En condiciones parcialmente saturadas las variables de estado, peso específico seco y el contenido de agua, pueden quedar alternativamente representadas por dos variables de esfuerzo: succión ( $s$ ), y esfuerzo medio de fluencia o preconsolidación en condiciones saturadas,  $p_v^*$ . Su virtud es que permite un análisis integrado del efecto que los cambios de esfuerzos y contenido de agua tienen sobre el comportamiento de los suelos compactados.

Los cambios en el contenido de agua asociados a la evaporación, lluvias o alteraciones de nivel freático implican cambios en la succión. El efecto de la disminución de succión en suelos compactados puede ser muy variada (colapso, expansión, cambios de rigidez).

En resumen, el estado inicial de los terraplenes compactados quedará definido por:

- El estado inicial de los esfuerzos (medio, desviador, succión).
- El peso específico seco inicial, que controla la extensión del dominio del comportamiento elástico.
- Parámetros iniciales del correspondiente modelo constitutivo del comportamiento del suelo. Algunos aspectos relevantes comunes a muchos modelos o marcos conceptuales de comportamiento de suelos compactados son:
  - El comportamiento elástico.
  - El comportamiento en rotura.
  - Los cambios volumétricos asociados a cambios en el contenido de agua o succión.

Algunos de estos parámetros están a su vez directamente controlados por las variables básicas de compactación. Así, es de esperar que los parámetros elásticos o los cambios de potenciales de volumen dependan del peso específico seco de compactación y de la succión (Zepeda, 2004).

### 3.2 Compactación

La compactación de suelos es un proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y la relación esfuerzo-deformación (Rico & Del Castillo, 1995).

Las características de mejoramiento que proporciona la compactación están ligadas con el peso volumétrico seco al que llega el suelo compactado, por esto, Proctor desarrollo las pruebas de compactación Proctor (AASHTO) estándar y Modificada. Estas pruebas dinámicas nos permiten conocer el peso volumétrico seco máximo que alcanza un suelo, con un contenido de agua óptimo, que es el contenido de agua con el cual el procedimiento de compactación es más eficiente (Rico & Del Castillo, 1995).

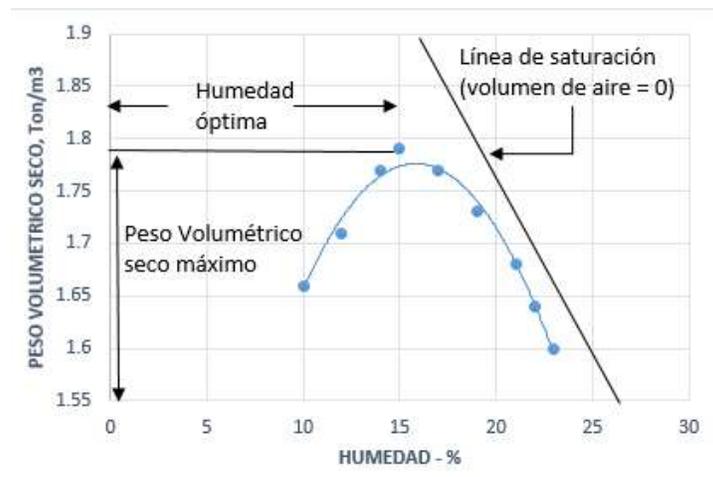


Figura 6 Curva de compactación típica (Rico & Del Castillo, 1995).

El grado de compactación de un suelo, es la relación que existe entre el peso volumétrico seco obtenido en campo y el peso volumétrico seco máximo obtenido

de las pruebas de laboratorio de dicho suelo y se expresa en porcentaje (Rico & Del Castillo, 1995).

$$G_c(\%) = 100 \frac{\gamma_d}{\gamma_{d\text{máx}}} \quad \text{Ecuación 5}$$

El grado de compactación y el contenido de agua inicial en un suelo fino compactado son de gran relevancia, ya que estos parámetros son los que controlarán el comportamiento del suelo a lo largo de su vida útil en la obra, obteniendo mejores resultados al compactar con contenidos de agua cercanos al óptimo. Al tener adecuados parámetros iniciales de compactación (que dan propiedades mecánicas adecuadas), se debe buscar la prevalencia de estos, para evitar cambios en la estructura del suelo, aunque en la mayoría de los casos es imposible debido a que ocurren infiltraciones, fuga de tuberías, cambios climatológicos, etc (Rico & Del Castillo, 1995).

### 3.2.1 Variación espacial del grado de compactación en terraplenes

La existencia de variaciones en la compactación del terraplén y en las pruebas de control asociadas ha sido reconocida durante varios años, aunque muchos ingenieros no se han preocupado mucho por el grado de variabilidad. La variabilidad espacial de las propiedades de los materiales es inherente tanto a los depósitos naturales del suelo como a las estructuras de tierra, sin embargo, a menudo se ignora durante el diseño geotécnico.

Los ingenieros de carreteras se han vuelto más conscientes e interesados en la variabilidad en la compactación, debido principalmente a los esfuerzos de la Oficina de Carreteras Públicas de los Estados Unidos para mejorar las especificaciones actuales (Sherman, Watkins y Prysock, 1967).

La especificación de compactación de terraplenes utilizada en la prueba de carretera de AASHO incluyó el concepto estadístico de control de calidad, que también ayudó a estimular este interés. Sin embargo, el uso de métodos estadísticos en la prueba de carretera fue principalmente para asegurar la

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

uniformidad de la calidad con el fin de correlacionar mejor el rendimiento de la carretera con la calidad de la construcción. Por lo tanto, el objetivo principal era controlar la variación de la compactación tanto como fuera práctico en lugar de determinar las variaciones obtenidas con los procedimientos de construcción habituales (Sherman *et al.*, 1967).

En México, se cuenta con el manual de control y aseguramiento de calidad, el cual describe los procedimientos para analizar, mediante cartas de control u otros métodos estadísticos, los resultados de las mediciones, pruebas de campo o pruebas de laboratorio que se realicen a muestras seleccionadas al azar con un procedimiento basado en tablas de números aleatorios.

En la Figura 7, se observa una carta de control típica. En el eje horizontal se indica el número de muestras y en el eje vertical el del Parámetro estadístico de la característica medible o contable, que, para este caso, sería el Grado de compactación. En ella se grafican los valores de dicho parámetro obtenidos de cada muestra; uniéndolos con líneas los puntos dibujados se obtiene una poligonal abierta denominada gráfica de tendencias; en el valor correspondiente al promedio de las magnitudes del parámetro estadístico, se traza una paralela al eje de los números de las muestras, denominada calidad promedio, de la que depende la posición de los límites estadísticos entre los que se considera que las variaciones se deben a causas aleatorias, definiéndose así la zona de aceptación.

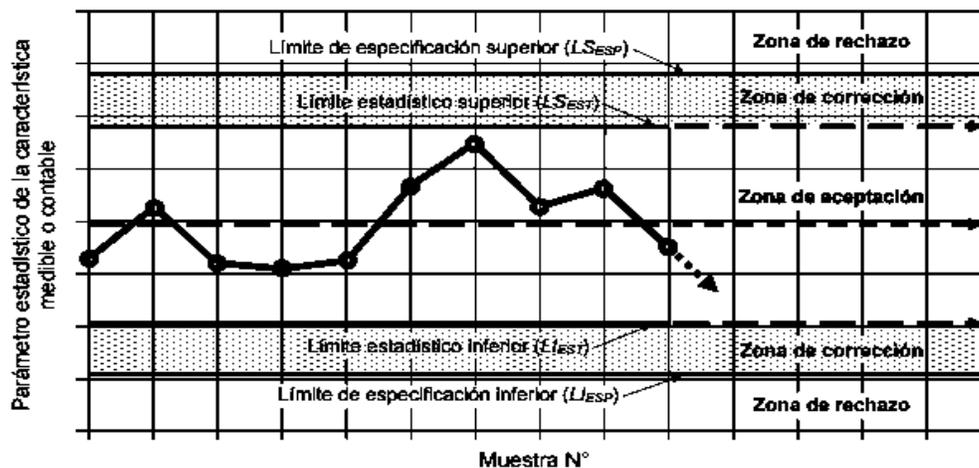


Figura 7 Carta control típica con límites de especificación (M-CAL-1-03/03).

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Los límites de especificación corresponden a las tolerancias especificadas y éstos resultan más amplios que los límites estadísticos, como se muestra en la Figura 7, entonces se generan zonas de corrección y zonas de rechazo, de manera que si los valores obtenidos de las muestras están dentro de los límites estadísticos significa que el proceso está bajo control, es decir, que sólo están actuando causas aleatorias, pero si algún valor se ubica en una zona de corrección, es muy probable que estén actuando una o varias causas asignables, sin que exista una no conformidad con el requisito establecido, pues aún se estará dentro de tolerancias, por lo que es momento de corregir el proceso; de lo contrario, se corre el riesgo de caer en zona de rechazo y generarse una no conformidad (M-CAL-1-03/03).

En el estudio realizado por Sherman, Watkins y Prysock (1967), se examinó estadísticamente la distribución del porcentaje de compactación relativa de tres proyectos de terraplenes, cuyos suelos variaban de material homogéneo a muy heterogéneo.

Un análisis de los resultados de compactación relativa porcentual para los tres proyectos reveló valores promedio de 92.9, 90.5 y 93.6 por ciento con desviaciones estándar de 2.4, 3.1 y 5.5 por ciento, respectivamente. Se encontró que la mayor dispersión en los resultados existía para los suelos heterogéneos (ver Figura 8, Figura 9 y Figura 10).

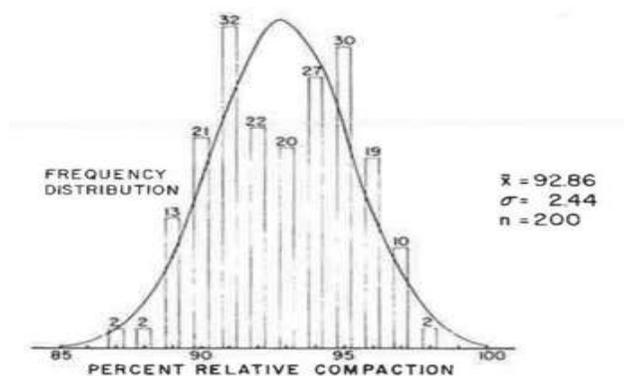


Figura 8 Histograma de la compactación relativa del proyecto 1 (Sherman, Watkins, & Prysock, 1967).

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

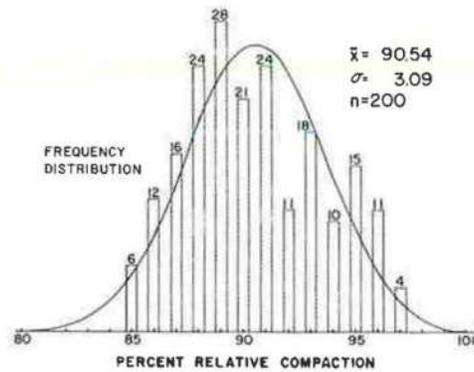


Figura 9 Histograma de la compactación relativa del proyecto 2 (Sherman, Watkins, & Prysock, 1967).

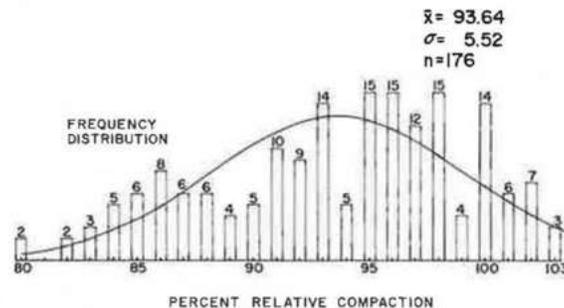


Figura 10 Histograma de la compactación relativa del proyecto 3 (Sherman, Watkins, & Prysock, 1967).

Por otro lado, Davis observó los efectos de las variaciones del suelo sobre la compactación en 1953. Sus estudios estadísticos fueron en 29 ubicaciones de construcción en 23 proyectos de presas de tierra. Davis informó desviaciones estándar que van desde aproximadamente un 1.8 a un 5.0 por ciento de compactación relativa con las 29 ubicaciones con un promedio de un 3.3 por ciento.

La desviación estándar para el suelo de terraplén bajo secciones de pavimento flexible de la carretera de prueba AASHO fue de aproximadamente 1.85 por ciento de compactación relativa. Esta es una baja desviación estándar, debido a que se obtuvo con un control mucho más rígido y un mayor número de pruebas de las que serían económicas para proyectos de construcción normales. Otro factor que contribuyó a la baja desviación estándar fue el suelo extremadamente uniforme utilizado en la carretera de prueba (Sherman *et al.*, 1967).

### 3.2.2 Grado de compactación v.s. porosidad

Desde el punto de vista práctico, la porosidad es uno de los parámetros más fácilmente observables para evaluar la heterogeneidad del suelo y puede medirse in situ con relativa facilidad.

La porosidad del suelo superficial determina en gran medida los procesos de infiltración y escurrimiento del agua que influyen en la erosión hídrica y el transporte de agua en el suelo. El flujo de agua y aire se realiza a través de la porosidad del suelo, condicionada por el tamaño, abundancia y distribución de poros. La porosidad es también un indicador de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Buckman & Brady, 1977).

Para la realización de esta investigación, se relacionó el grado de compactación, con la porosidad del material, ya que la porosidad es una variable que se puede modificar con mayor facilidad en el programa implementado; esta relación se hizo por medio de la siguiente ecuación:

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w S_s} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- $n$  = Porosidad
- $\gamma_d$  = Peso específico seco suelto =  $G_c * \gamma_{d \max}$
- $\gamma_w$  = Peso específico del agua
- $S_s$  = Densidad de los sólidos

### 3.2.3 Implementación del variograma en las porosidades

Buena parte de las variables de características geológicas de una región o cuerpo mineralizado, pueden ser descriptas en forma aceptable por el variograma. Esta es la herramienta básica y fundamental de la geoestadística, la que, con un uso adecuado, nos permitirá abordar el estudio de la distribución espacial de los datos y su interpretación y relación con los aspectos geológicos conocidos.

Con los variogramas, podemos analizar el grado de interdependencia de los datos en el espacio geométrico y las zonas de influencia de cada dato; la anisotropía de la información espacial y con ello la mayor o menor continuidad en distintas direcciones; la posibilidad de estructuras sobrepuestas y otras características de las distribuciones.

El semivariograma  $\gamma(h)$  es la mitad del variograma y fue definido por primera vez por Matheron (1963) como la mitad de la diferencia cuadrática promedio entre los valores en los puntos ( $s_1$  y  $s_2$ ) separados a distancia  $h$ . En otras palabras, el variograma ( $2\gamma(h)$ ) se puede definir como la varianza ( $\sigma_v^2$ ) de la diferencia entre los valores de campo en dos ubicaciones.

Para describir los variogramas, se suelen utilizar los siguientes parámetros:

- Pepita (nugget) ( $n$ ): La altura del salto del semivariograma en la discontinuidad en el origen.
- Meseta ( $s$ ): Límite del variograma que tiende a distancias de retardo infinitas.
- Distancia ( $r$ ): La distancia en la que la diferencia entre el variograma y la meseta se vuelve insignificante. En los modelos con meseta fija, es la distancia a la que se alcanza por primera vez; para los modelos con una meseta asintótica, convencionalmente se toma como la distancia cuando la semivarianza alcanza por primera vez el 95% de la meseta.
- Rango o alcance ( $a$ ): Es la distancia  $h$  a la cual el variograma alcanza el valor de la meseta o el 95% del valor del umbral si el variograma tiende asintóticamente a dicho valor.
- El alcance " $a$ " propicia una medida de la zona de relación entre muestras a distancia  $h$ , donde:
  - Una distancia mayor al rango o alcance indica que las muestras se consideran independientes (Independencia espacial).
  - Una distancia menor al rango o alcance indica muestras correlacionadas entre sí (Dependencia espacial).

En la Figura 11 se muestran los elementos que describen el variograma.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

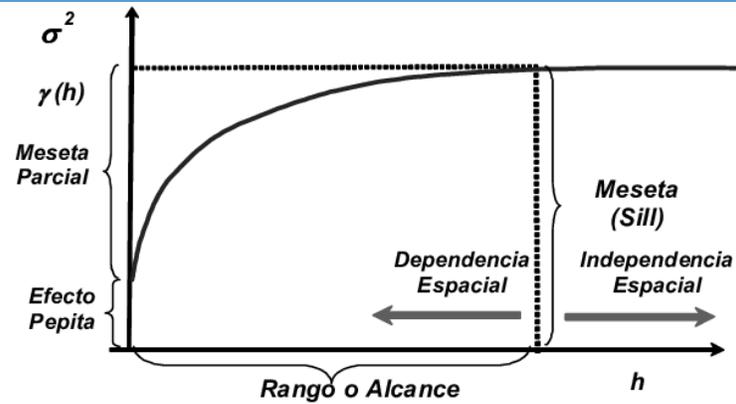


Figura 11 Elementos del variograma.

### 3.2.3.1 Mapa variográfico

Consiste en visualizar el variograma en todas sus direcciones del espacio, bajo la forma de un mapa con escala de color. En este mapa se puede distinguir si existe la anisotropía y calcular el variograma experimental a lo largo de las direcciones principales de anisotropía.

En la siguiente figura se muestra un mapa variográfico que dibuja una dirección de mayor continuidad con una orientación de  $60^\circ$  aproximadamente desde el eje nort-sur, y el cálculo del variograma experimental a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas ( $N60^\circ E$  y  $N30^\circ W$ ) (Emery, 2013).

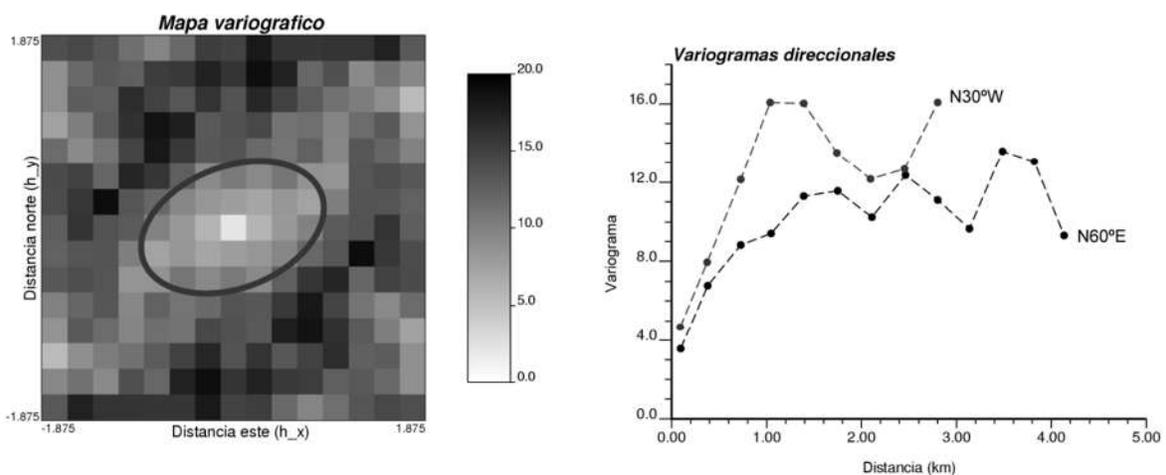


Figura 12 Mapa variográfico (izquierda) y variograma experimental calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas ( $N60^\circ E$  y  $N30^\circ W$ ) (derecha) (Emery, 2013).

3.2.3.2 Modelos de variograma

Una función es un variograma si y sólo si es de tipo negativo condicional. Es una propiedad muy restrictiva y difícil de controlar, incluso si se trabaja en un espacio de una dimensión. Por esto, en general, se elige un modelo de variograma entre las funciones de las cuales sabemos que son de tipo negativo condicional (Emery, 2013).

Los tres modelos de variogramas habitualmente utilizados son (Chiles & Delfiner, 1999, Cressie, 1993):

**Modelo esférico:** es el que mejor se suele ajustar cuando se trata de variables mineras. Este presenta una curva del semivariograma que aumenta rápidamente para bajos valores del lag (retraso) para, posteriormente, ascender más lentamente hasta alcanzar una zona plana a valores del lag (retraso) altos.

$$\gamma(h) = \frac{\sigma_v^2}{\sigma_v^2} \left( 1.5 \left( \frac{|h|}{a} \right) - 0.5 \left( \frac{|h|}{a} \right)^3 \right) \quad \begin{matrix} \text{si } |h| \leq a \\ \text{si } |h| > a \end{matrix} \quad \text{Ecuación 7}$$

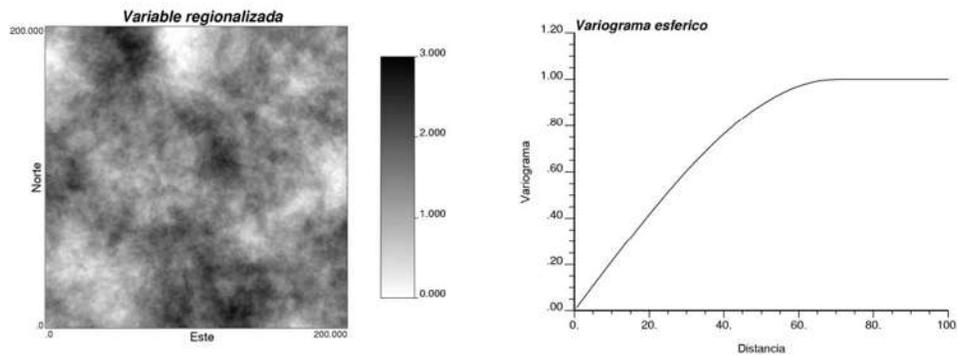


Figura 13 Variograma esférico (derecha) y ejemplo de variable regionalizada asociada (izquierda) (Emery, 2013).

**Modelo Exponencial:** Este modelo va ascendiendo lentamente hasta alcanzar la meseta a un valor constante. En este esquema la tangente en el origen intercepta la meseta a un valor de  $a/3$ .

$$\gamma(h) = \sigma_v^2 \left( 1 - \exp^{-3\left(\frac{|h|}{a}\right)} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

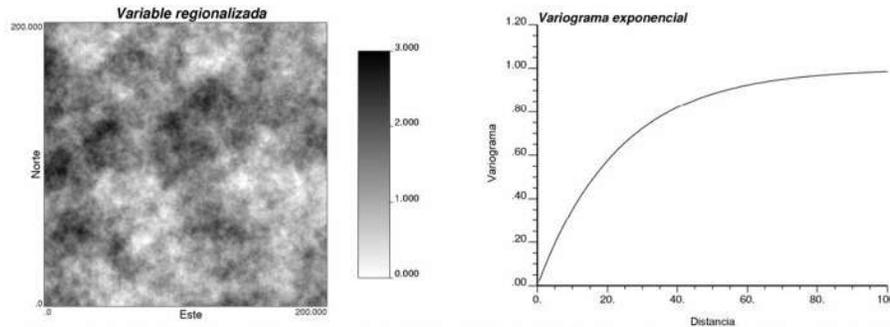


Figura 14 Variograma exponencial (derecha) y ejemplo de variable regionalizada asociada (izquierda) (Emery, 2013).

**Modelo gaussiano:** Al igual que el modelo exponencial, este modelo va ascendiendo hasta alcanzar la meseta a un valor constante, con la diferencia, de que, en este caso, la tangente en el origen intercepta la meseta a un valor de  $a/\sqrt{3}$ .

$$\gamma(h) = \sigma_v^2 \left( 1 - \exp^{-3\left(\frac{|h|}{a}\right)^2} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

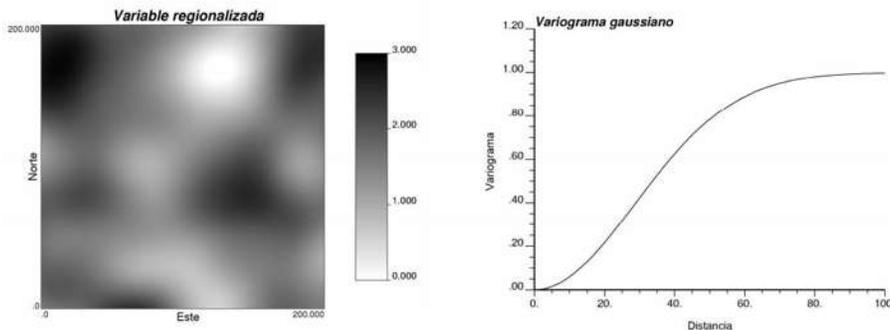


Figura 15 Variograma Gaussiano (derecha) y ejemplo de variable regionalizada asociada (izquierda) (Emery, 2013).

El variograma gaussiano varía más suavemente que los otros en un entorno del origen, con lo que le da más peso a los puntos más cercanos al punto de estimación, lo cual implica una mayor continuidad espacial de la solución, es decir los valores estimados variarán más suavemente con un variograma gaussiano que con uno

exponencial o uno esférico y por ello, el variograma gaussiano fue el elegido para implementarlo en esta investigación.

### 3.3 Suelos colapsables

Los fenómenos más característicos del comportamiento del suelo en estado parcialmente saturado son los relacionados con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser tanto positivas, en cuyo caso se produce un colapso, como negativas, en cuyo caso se produce una expansión.

Los suelos compactados que se consideran estables pueden ser colapsables dependiendo del intervalo en la aplicación de la carga y otros factores. De hecho, cualquier suelo parcialmente saturado que no contenga minerales expansivos abundantes puede tener características colapsables.

Los suelos colapsables son altamente inestables ante fenómenos extremos (como el cambio climatológico). Sin embargo, hay que considerar que, si los suelos se identifican oportunamente, los problemas que se presentan se resuelven en forma técnica y económicamente aceptable, tomando en cuenta la colapsabilidad del suelo, causas que producen saturación y estimación de asentamientos por colapso. Lo anterior es con el fin de que se pueden sugerir recomendaciones, métodos adecuados de estabilización o de diseño (CONAGUA, 2007).

#### 3.3.1 Mecanismos de colapso

Se puede afirmar que todos los suelos parcialmente saturados tienen ciertas características colapsables. La magnitud de los asentamientos puede variar enormemente de un tipo al otro. Los mecanismos que originan el colapso del suelo en condiciones de saturación se pueden clasificar en los siguientes puntos (Barrera, & Garnica, 2002):

- Estructura abierta, tipo panal de abeja, capaz de reducir significativamente su volumen a expensas de una disminución del volumen de poros.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

- Un estado exterior de carga suficientemente grande como para generar una condición metaestable para la succión aplicada. El concepto de “metaestable” consiste en considerar a un suelo estable con respecto a pequeños disturbios, pero capaz de reaccionar violentamente si la molestia es considerable.
- La presencia de enlaces entre las partículas que aumenten la rigidez del suelo y que puedan ser perdidos al aumentar el grado de saturación.

Una estructura muy abierta soportando una carga exterior grande sin deformación y en estado parcialmente saturado indica la alta probabilidad de que su estabilidad sea debida a enlaces, que pueden ser temporales. Un aumento del grado de saturación puede conllevar la pérdida de estos enlaces y de la rigidez por ellos provocadas, produciéndose el colapso.

Se consideran dos partículas esféricas en contacto como se muestra en la Figura 16. El agua se mantiene en los contactos de partículas y, debido a los efectos capilares, permanece en tensión. Los meniscos de contacto introducen una fuerza de compresión neta,  $F_c$ , normal al plano tangente entre las dos esferas en el punto de contacto (Alonso *et al.*, 2010).

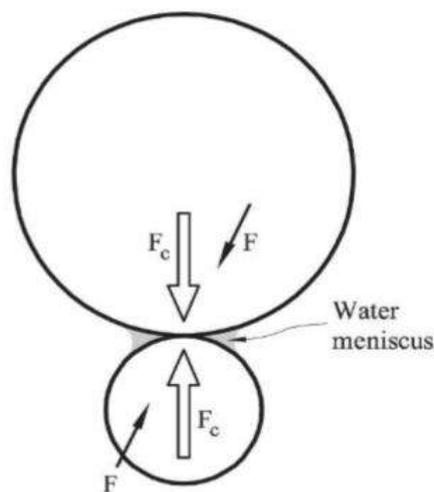


Figura 16 Menisco de agua en el contacto entre dos granos esféricos (Alonso *et al.*, 2010).

Esta es una fuerza estabilizadora que ayuda a resistir las fuerzas inducidas por esfuerzos externos ( $F$ ) que, en general, introducen una cizalla dada en los

contactos. Las inundaciones de agua destruyen la fuerza estabilizadora  $F_c$  y conducen a una reorganización de la microestructura del suelo que se percibe externamente como una compresión volumétrica.

Abelev (1975) (citado por Barrera y Garnica, 2002), confirma que el colapso de un suelo tan sólo ocurre una vez para un esfuerzo exterior y un grado de saturación máximo dado, de acuerdo con los mecanismos expuestos. Tras el proceso de colapso el suelo llega a una estructura estable que no dará origen a colapsos adicionales a no ser que la combinación de los esfuerzos exteriores y del grado de saturación sitúe de nuevo al suelo en estado de inestabilidad.

Dudley (1970) (citado por Barrera y Garnica, 2002) señala la existencia de una humedad, para cada suelo, en la que el colapso producido al aumentar el grado de saturación es máximo. Aun cuando se observa que la magnitud del colapso se incrementa con la carga exterior aplicada si ésta no es muy elevada, se constata asimismo que este incremento tiene un límite, alcanzando el colapso máximo para una determinada carga, en general alta, y disminuyendo posteriormente. Este comportamiento está justificado por cuanto la reducción de la relación de vacíos de un suelo al someterlo a un esfuerzo exterior elevada puede ser considerable, aun existiendo enlaces entre partículas que rigidicen la estructura, disminuyendo el colapso potencial. El valor de la presión a la que se produce este máximo varía notablemente con el tipo de suelo considerado.

En un caso real de colapso del suelo de un estrato de terreno las deformaciones no serán, en general, uniformes en profundidad, debido a las diferentes propiedades y del estado de esfuerzos en cada punto. En muchas ocasiones, aunque el asentamiento se refleja en superficies, son capas profundas, sometidas a mayores presiones por la acción del peso del terreno, las que colapsan primero. Este proceso, puede verse modificado por el propio estado del suelo en cada profundidad, o, por ejemplo, por la accesibilidad del factor que provoca el colapso (agua procedente de la rotura de una tubería, inundación superficial del terreno, etc.).

A diferencia del carácter potencialmente cíclico de los fenómenos de expansión y contracción, el colapso es un fenómeno irreversible lo que de alguna forma simplifica su tratamiento y estudio. Pero sus efectos pueden ser muy destructivos (deformaciones altas). Los terraplenes mal compactados son un caso relativamente frecuente que se manifiesta en daños del pavimento y muy singularmente en las transiciones de terraplenes a obras estructurales del pavimento.

Un aspecto interesante es el establecimiento de criterios de compactación que conduzcan a un suelo esencialmente estable en volumen frente a futuros cambios de humedad. La compactación por el lado seco tiene siempre un riesgo asociado de cambio de volumen. Las energías en torno al Proctor Normal no evitan en muchos casos el colapso al humedecer. Las energías cercanas al Proctor Modificado sobre suelos arcillosos conducen con frecuencia a condiciones de expansión. Son más seguros los contenidos de humedad óptimos e incluso superiores. Un buen criterio práctico debe especificar tanto el peso específico como el contenido de agua a partir de una caracterización previa mediante ensayos de laboratorio (Zepeda, 2004).

### 3.3.2 Deformación plástica de los suelos parcialmente saturados

Un punto de partida conveniente para comprender el colapso es considerar la respuesta de un suelo parcialmente saturado sometido a carga isotrópica a diferentes succiones aplicadas ( $s=0$ ,  $s=s_1$ ,  $s=s_2$ , las rutas de esfuerzo se dan en la Figura 17a). Como punto de partida se toma la respuesta del suelo en condiciones saturadas ( $s=0$ ) como referencia. El suelo se comporta elásticamente antes de que se alcance un punto de fluencia  $Y_0$  (esfuerzo de fluencia  $p_0^*$ ). La compresibilidad elástica (la pendiente de la línea de compresión elástica en el plano  $e - \ln p$ ) se define por  $k$ . Más allá del punto de fluencia, el suelo seguirá una línea de compresibilidad virgen con una rigidez definida por un coeficiente de compresibilidad  $\lambda(0)$  (para  $s=0$ ).

El efecto de la succión es permitir que el suelo mantenga relaciones de vacío más altas que las correspondientes a la línea de compresión virgen saturada. Los experimentos pueden interpretarse en el sentido de que la succión aumenta el límite elástico a los valores  $p_{01}$  para  $s=s_1$ ,  $p_{02}$  para  $s = s_2$ , etc. Más allá del límite elástico,

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

la respuesta no saturada se caracterizará por un coeficiente  $\lambda(s)$  de compresibilidad que, en general, dependerá de la succión. Si los puntos  $p_0^*$ ,  $p_{01}$ ,  $p_{02}$  se recogen en el espacio  $(p, s)$  (Figura 17c) se definirá una curva de fluencia que se denominó de carga-colapso (LC) por las razones que se darán abajo. Los puntos a la izquierda de LC permanecerán en un estado elástico. En la Figura 17b, todas las líneas de compresión para esfuerzos por debajo de los puntos de fluencia se trazan en paralelo con un índice de compresión elástica común. Se debe tomar en cuenta que comienzan con una relación de vacíos diferente ( $e_0 > e_1 > e_2$ ) porque la aplicación de una succión creciente (secado) da como resultado una compresión volumétrica (contracción).

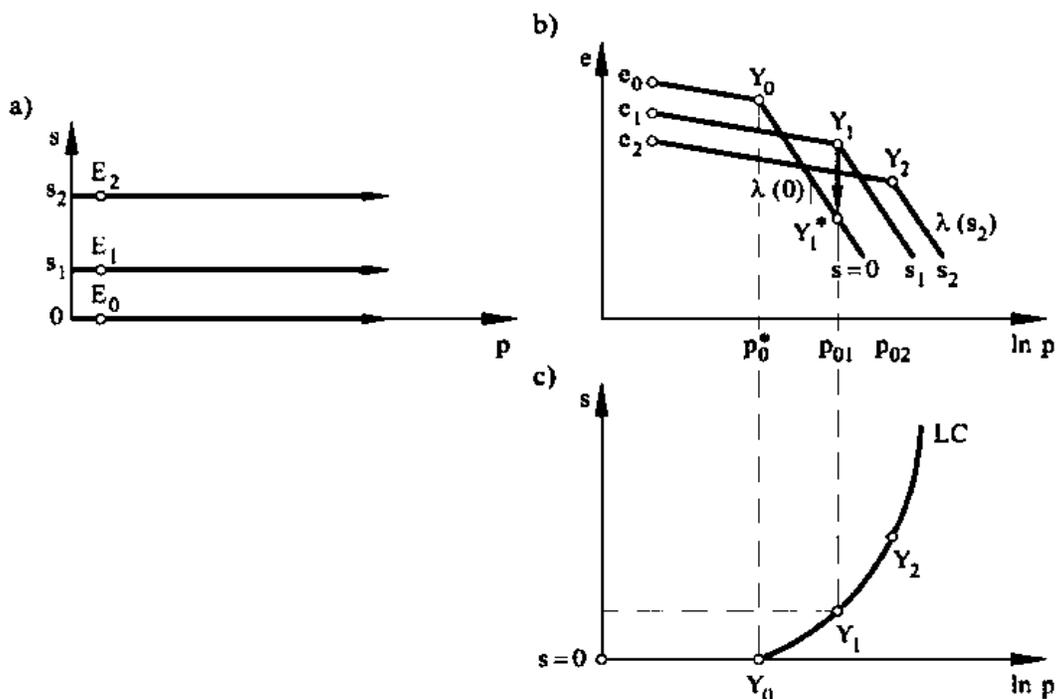


Figura 17 (a) Trayectorias de esfuerzo para carga isotrópica a succión constante; (b) curvas de compresión; (c) puntos de fluencia y curva de fluencia LC (Alonso et al., 2010).

Humedecer el suelo de un estado dado en la curva de fluencia, como  $Y_1$  (para succión  $s_1$ ) a  $s=0$  implicará una reducción en el volumen porque el estado de equilibrio bajo esfuerzo  $p_{01}$  y succión cero ( $s=0$ ) es el estado  $Y_1^*$  en la Figura 17b. El cambio en la relación de vacío del punto  $Y_1$  al punto  $Y_1^*$  es una deformación por colapso.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Esta idea se utiliza nuevamente en la Figura 18. Considere un Punto 1 ( $p_1, s$ ) en la curva de fluencia LC; y su estado correspondiente en el gráfico  $e$  vs.  $\ln p$ . Si se humedece a constante  $p=p_1$ , la relación de vacíos evolucionará del punto 1 a 3 en la Figura 18b. La curva de fluencia LC también se arrastrará a su nueva posición  $LC_f$ . La ruta 1-3 en la Figura 18 es una ruta de colapso. El suelo experimentará la misma compresión irreversible si se carga con succión constante desde el punto 1 al 2. Se deformará siguiendo la línea de compresión para la succión  $s$ . En ambos casos, tiene lugar un proceso de endurecimiento. Estas gráficas indican que el comportamiento de carga y colapso están íntimamente relacionados. Esta es la razón por la que se le dio el nombre LC al lugar geométrico de fluencia isotrópico en el plano  $(p, s)$ .

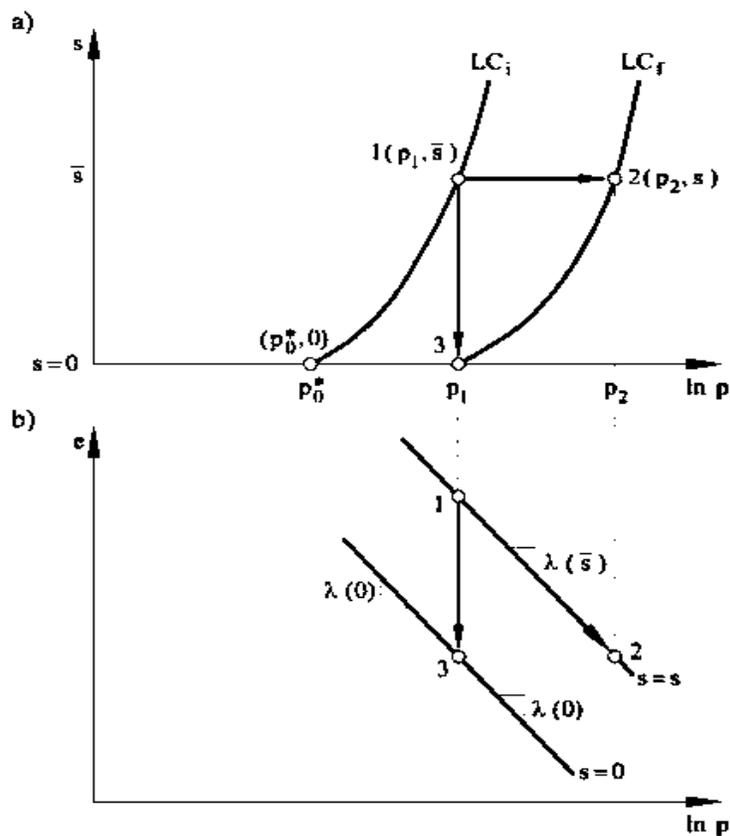


Figura 18 (a) carga (1- 2) y colapso (1- 3) rutas; (b) respuesta esperada del suelo (Alonso et al., 2010).

El bosquejo en la Figura 19 muestra las dos rutas alternativas de esfuerzo-succión que conducen a la misma deformación volumétrica. El estado del suelo en el Punto

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

1 está representado por una estructura "abierta". La disposición de los agregados de arcilla y partículas de arena o limo se adapta a los poros de gran tamaño. El suelo en este estado está en equilibrio bajo un esfuerzo limitante  $p$  y una succión  $s$ . La succión existente y su conjunto asociado de fuerzas estabilizadoras internas ayudan a mantener la estructura abierta. Si la succión se reduce a cero (trayectoria inferior en la figura), las fuerzas capilares desaparecen y los granos ya no están en equilibrio bajo el esfuerzo aplicado. Caen en nuevas posiciones más densas y esto se indica en la evolución asumida de la microestructura. Pero aumentar la carga en una succión mantenida (trayectoria superior en la figura) esencialmente induce el mismo mecanismo de deformación. La succión se mantiene, pero ahora no puede garantizar la estructura inicial del suelo bajo un esfuerzo creciente. Por lo tanto, la curva de fluencia LC representa la disposición límite de partículas y agregados de arcilla capaces de mantenerse en equilibrio bajo una combinación dada de  $p$  y  $s$ . Este es el significado de la curva de fluencia. Cualquier aumento en  $p$ , disminución en  $s$ , o cualquier combinación de estos, implica un nuevo equilibrio, un estado más comprimido y un desplazamiento asociado de LC produce un lugar geométrico hacia la derecha.

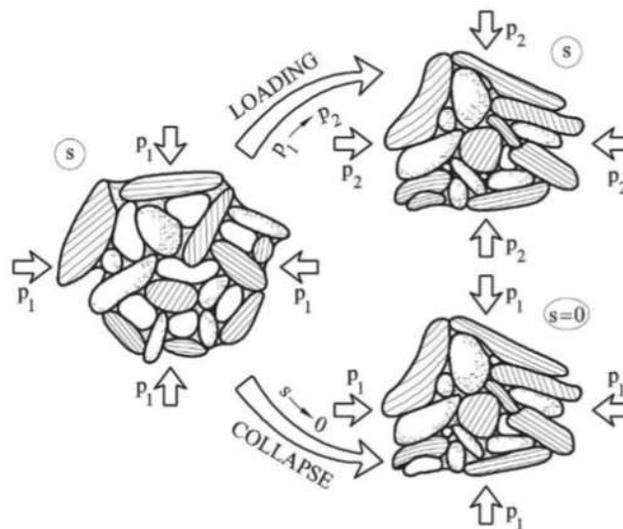


Figura 19 Boceto que muestra una interpretación del colapso y la carga en suelos no saturados (Alonso y Gens (1994) © 1994 Taylor and Francis Group).

3.3.3 Modelo básico de Barcelona

El uso de un modelo elasto-plástico en mecánica de suelos ha sido apropiado para reproducir el comportamiento del suelo en procesos independientes del tiempo (Barrera, 2004).

El modelo constitutivo básico de Barcelona, mejor conocido por su acrónimo como BBM, desarrollado por Alonso, Gens y Josa (1990) es un modelo elasto-plástico que se utiliza para describir el comportamiento esfuerzo-deformación de suelos parcialmente saturados. Este modelo tiene un rango de aplicabilidad a suelos poco o moderadamente expansivos.

Las variables de esfuerzos utilizadas en el modelo son:

- El exceso de esfuerzo medio  $\sigma_m$ , sobre la presión del aire (Esfuerzo medio neto):  $p = \sigma_m - u_a$  ;  $\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}$
- La succión:  $s = u_a - u_w$
- El esfuerzo desviador:  $q = \sigma_1 - \sigma_3$

En el plano isotrópico ( $p, s$ ) se encuentra la curva LC (Loading-Collapse), la cual se definió en el apartado anterior.

Considere una prueba isotrópica en la que una muestra de suelo en una succión dada (posteriormente mantenida) se somete a incrementos de carga  $p$  a lo largo de estados vírgenes. En total correspondencia con el comportamiento de los suelos saturados, el volumen específico,  $v = 1 + e$ , vendrá dado por:

$$v = N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p}{p^c} \quad \text{Ecuación 10}$$

donde  $p^c$  es un estado de esfuerzo de referencia para el cual  $v = N(s)$ . El parámetro plástico de rigidez  $\lambda$  depende de la succión (decrece al aumentar ésta). Al descargar y recargar (a succión constante) se supone que el suelo se comporta elásticamente:

$$dv = -k \frac{dp}{p} \quad \text{Ecuación 11}$$

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Aunque también es probable que exista cierta dependencia de  $k$  en  $s$ , se ha adoptado un valor constante para garantizar que la parte elástica del modelo sea conservadora. En la Figura 20 se ofrece una representación esquemática de la Ecuación 10 y Ecuación 11.

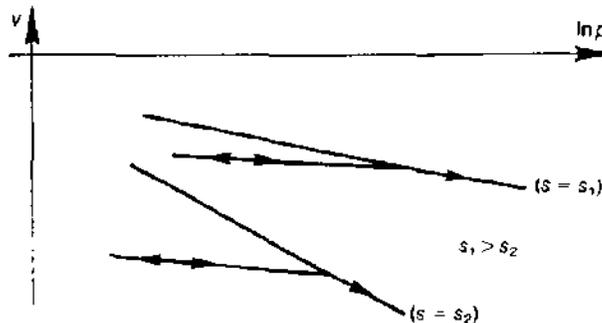


Figura 20 Variación propuesta de volumen específico con esfuerzo media neta y succión a lo largo de rutas vírgenes y de descarga-recarga (Alonso et al., 1990).

Considere en la Figura 21a la respuesta a la carga isotrópica de dos muestras sometidas a diferentes succiones:  $s=0$  (caso saturado) y una succión mayor  $s$ . El esfuerzo de preconsolidación saturada se etiqueta  $p_0^*$  (punto 3 en la Figura 21a). La segunda muestra rendirá con un esfuerzo isotrópico  $p_0$  mayor (punto 1).



$$v_1 + \Delta v_p + \Delta v_s = v_3 \quad \text{Ecuación 12}$$

donde las diferentes cantidades se indican en la Figura 21 (a).

La descarga por succión (humectación) de 2 a 3 ocurre en el dominio elástico. En estas circunstancias, se produce un  $\Delta v_s$  de expansión reversible que viene dado por una expresión logarítmica similar a la Ecuación 11:

$$dv = -k_s (ds/(s + p_{at})) \quad \text{Ecuación 13}$$

$p_{at}$ , se ha agregado a  $s$  para evitar valores infinitos a medida que  $s$  se acerca a cero.

Teniendo en cuenta las ecuaciones Ecuación 10, Ecuación 11, Ecuación 13 y La Ecuación 12 se convierte en:

$$N(s) - \lambda(s) \ln \frac{p_o}{p^c} + \kappa \ln \frac{p_o}{p_o^*} + \kappa_s \ln \frac{s + p_{at}}{p_{at}} = N(0) - \lambda(0) \ln \frac{p_o^*}{p^c} \quad \text{Ecuación 14}$$

que proporciona una relación entre  $p_o$  y  $s$  en función de algunos valores de esfuerzo de referencia ( $p_o^*$ ,  $p^c$ ) y algunos parámetros del suelo ( $N(s)$ ,  $\lambda(s)$ ,  $k$ ,  $k_s$ ). Una opción conveniente de  $p^c$  y  $N(s)$  para simplificar la Ecuación 14 es asumir la igualdad en la siguiente ecuación (Figura 21a)

$$\Delta v (p^c)|_s^0 = N(0) - N(s) = \kappa_s \ln \frac{s + p_{at}}{p_{at}} \quad \text{Ecuación 15}$$

En otras palabras,  $p^c$  es el esfuerzo medio neto a la que se puede alcanzar el estado virgen saturado, comenzando en una condición parcialmente saturada, a través de una vía de humectación que implica solo hinchamiento (elástico).

Si se introduce la Ecuación 15 en la Ecuación 14, se obtiene la siguiente relación:

$$\left(\frac{p_o}{p^c}\right) = \left(\frac{p_o^*}{p^c}\right)^{[\lambda(0)-\kappa]/[\lambda(s)-\kappa]} \quad \text{Ecuación 16}$$

Que es la ecuación que define la curva LC. Ésta determina los valores de la presión de preconsolidación  $p_0$  en función de la succión ( $s$ ). De hecho, puede considerarse como una familia de curvas en el espacio ( $p, s$ ), de la que se puede aislar una curva de fluencia especificando el valor de  $p_0^*$ , que puede considerarse el parámetro de endurecimiento. Esta ecuación juega un papel central en el modelo y explica tanto el incremento del esfuerzo de preconsolidación con la succión como el fenómeno de colapso al saturar.

La ecuación que describe el incremento de la rigidez (plástica) del suelo con la succión, tendiendo asintóticamente a una rigidez máxima, es:

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1 - r) \exp(-\beta s) + r] \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde  $\lambda(0)$  es el parámetro de compresibilidad plástica en condiciones saturadas,  $r$  determina la rigidez máxima del suelo (cuando la succión tiende a infinito), es decir,  $r = \lambda(s \rightarrow \infty) / \lambda(0)$ , y el parámetro  $\beta$  determina la tasa de incremento de la rigidez con la succión. Como se ha dicho, incrementos de la succión también pueden producir deformaciones irreversibles. Debido a este fenómeno se introduce otra superficie de fluencia, denominada SI (suction increase). A falta de más información experimental se adopta:

$$s = s_0 \quad \text{Ecuación 18}$$

$s_0$  puede entenderse como la succión máxima experimentada por el suelo a lo largo de su historia. Si se supera este valor de la succión el suelo sale de la región elástica, en la cual se comporta según la Ecuación 13 para cambios de succión, y plastifica siguiendo la expresión análoga:

$$dv = -\lambda_s \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde  $\lambda_s$  es el parámetro de rigidez plástica para cambios en la succión.

Las curvas LC y SI limitan la región del espacio ( $p, s$ ) dentro de la cual el suelo se comporta elásticamente. Sobre ellas se comporta elasto-plásticamente. En la Figura

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

22 puede observarse esquemáticamente el dominio elástico y las dos curvas de fluencia.

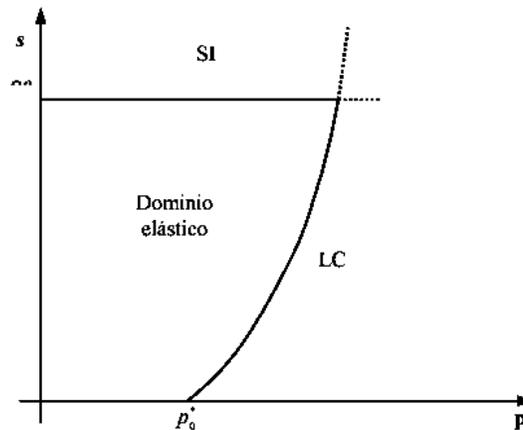


Figura 22 Curvas de fluencia LC y SI en el espacio (p,s).

Las expresiones de las deformaciones volumétricas:

La deformación volumétrica elástica debida a variaciones en  $p$  vendrá dada por la Ecuación 11:

$$d\varepsilon_{vp}^e = -\frac{dv}{v} = \frac{\kappa dp}{v p} \quad \text{Ecuación 20}$$

Al alcanzar la presión de preconsolidación  $p_0$  el suelo sufre deformaciones elasto-plásticas. La deformación total será:

$$d\varepsilon_{vp} = \frac{\lambda(s) dp_0}{v p_0} \quad \text{Ecuación 21}$$

De la cual puede aislarse la deformación plástica:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(s) - \kappa dp_0}{v p_0} \quad \text{Ecuación 22}$$

O, alternativamente:

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(0) - \kappa dp_0^*}{v p_0^*} \quad \text{Ecuación 23}$$

Análogamente, para cambios en la succión, la deformación volumétrica elástica viene dada por:

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{\kappa_s}{v} \frac{ds}{(s + p_{atm})} \quad \text{Ecuación 24}$$

Al alcanzar la curva SI, y aumentando la succión ( $s_0$ ), la deformación total será:

$$d\varepsilon_{vp} = \frac{\lambda_s}{v} \frac{ds_0}{(s_0 + p_{atm})} \quad \text{Ecuación 25}$$

Y la parte plástica de ésta:

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{v} \frac{ds_0}{(s_0 + p_{atm})} \quad \text{Ecuación 26}$$

La deformación volumétrica plástica total es:

$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_{vs}^p + d\varepsilon_{vp}^p \quad \text{Ecuación 27}$$

De la cual se derivan las leyes de rigidización:

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{v}{\lambda_s - \kappa_s} d\varepsilon_v^p \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\frac{ds_0}{(s_0 + p_{atm})} = \frac{v}{\lambda_s - \kappa_s} d\varepsilon_v^p \quad \text{Ecuación 29}$$

### 3.4 Índice de regularidad internacional (IRI)

El Índice de Regularidad internacional (IRI) es una medida de referencia que representa la regularidad de la superficie de un pavimento a través de un estadístico del perfil longitudinal del mismo. Este estadístico se calcula como la relación entre el desplazamiento acumulado de la suspensión de un vehículo específico y la distancia recorrida por el mismo a una velocidad de ochenta (80) kilómetros por hora (N-CSV-CAR-1-03-004/16).

El cálculo del IRI se basa en un modelo matemático llamado Cuarto de Carro (Quarter-Car). El sistema del Cuarto de Carro calcula la deflexión de la suspensión de un sistema mecánico simulado como una respuesta similar a la que tuviera el pasajero. Los desplazamientos de la suspensión del modelo son acumulados y

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

divididos entre la distancia recorrida para dar el IRI, en unidades de m/km., mm/m, in/mi, etc (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998).

Teóricamente, el IRI puede variar entre cero (0) para una superficie perfectamente plana hasta 16 metros por kilómetro o incluso más, para pavimentos altamente irregulares que experimentan una erosión avanzada y la existencia de depresiones profundas. En la Figura 23 se muestra la escala del IRI originalmente descrita por el Banco Mundial (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986).

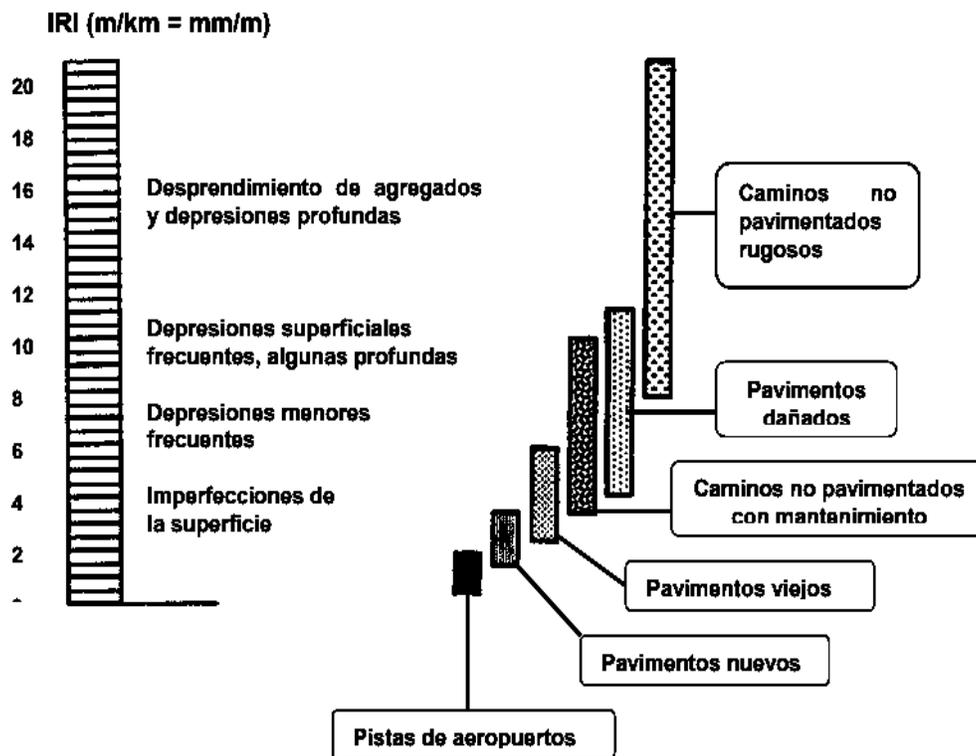


Figura 23 Escala original del Banco Mundial para el IRI (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986).

### 3.4.1 Calificación del estado de los tramos en función del IRI en México

El estado de tramos carreteros de la red federal, se clasifica en función de la regularidad utilizando intervalos de IRI que se identificaran con los descriptores “Bueno”, “Aceptable” y “No Satisfactorio”. En la siguiente tabla se especifican los intervalos para autopistas de cuota y corredores carreteros, y los intervalos para la red básica libre y red secundaria (N-CSV-CAR-1-03-004/16).

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Tabla 2 Intervalos de IRI para la clasificación de los tramos

Estado	Intervalo del IRI (m/km, mm/m)	
	Autopistas de cuota y corredores carreteros	Red básica libre y red secundaria
<b>Bueno</b>	< 1.8	< 2.5
<b>Aceptable</b>	1.8 a 2.5	2.5 a 3.5
<b>No Satisfactorio</b>	> 2.5	> 3.5

### 3.4.2 Características del modelo cuarto de carro

El modelo de Cuarto de Carro utilizado en el algoritmo del IRI debe su nombre a que implica la cuarta parte de un vehículo. El modelo se muestra en la Figura 24; incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de la suspensión, un amortiguador, y la masa del vehículo soportada por la suspensión de dicha rueda.

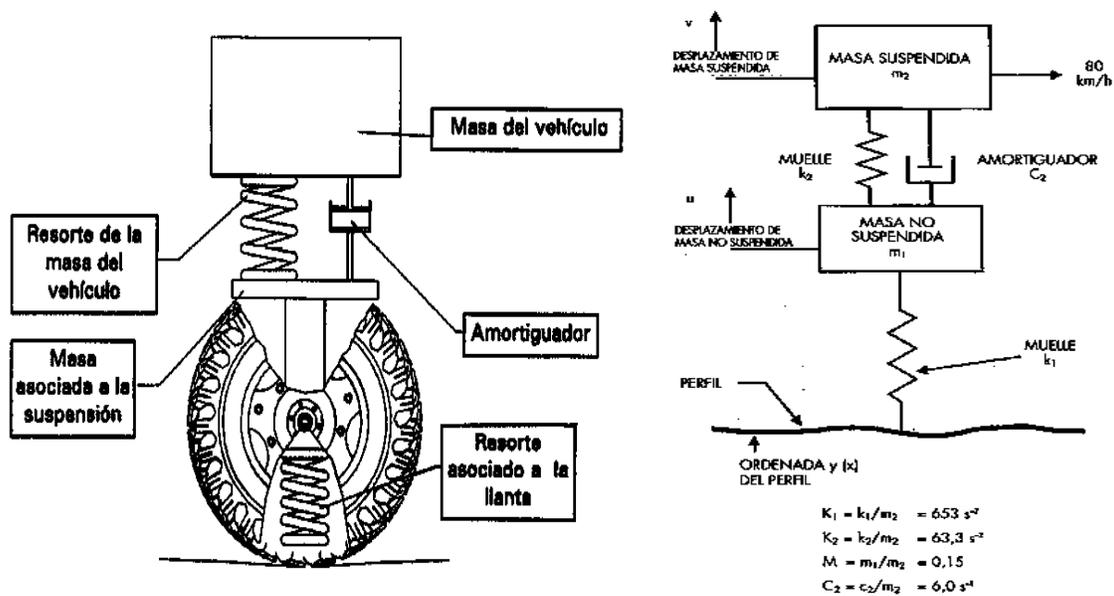


Figura 24 Esquema del análisis cuarto de carro en términos del modelo mecánico y diagrama de cuerpo libre (Sayers, Gillespie & Queiroz, 1986).

El modelo Cuarto de Carro fue ajustado para poder establecer una correlación con los sistemas de medición de rugosidad del tipo respuesta. El programa que propone

el Banco Mundial para el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad a partir del levantamiento topográfico de un tramo carretero representa la simulación del paso del Cuarto de Carro sobre el perfil del camino (Sayers, Gillespie & Queiroz, 1986).

Las ecuaciones diferenciales que expresan el movimiento de las masas suspendidas y no suspendidas son:

$$m_2\ddot{v} + c_2(\dot{v} - \dot{u}) + k_2(v - u) = 0 \quad \text{Ecuación 30}$$

$$m_2\ddot{v} + m_1\ddot{u} + k_1(u - y) = 0 \quad \text{Ecuación 31}$$

Siendo  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ , y  $c_2$  las constantes del cuarto de carro de la Figura 24, “ $u$ ” y “ $v$ ” los desplazamientos verticales de las masas no suspendida y suspendida respectivamente e “ $y$ ” es la cota del perfil recorrido, según la experimenta la rueda del vehículo (Perfil suavizado). Las derivadas de  $\dot{u}$ ,  $\dot{v}$ ,  $\ddot{u}$  y  $\ddot{v}$  lo son respecto al tiempo.

Estas ecuaciones diferenciales son las que se utilizan para el cálculo de los coeficientes  $S_{ij}$  y  $P_j$ .

### 3.4.3 Ecuaciones para el cálculo del IRI

El cálculo de IRI se logra calculando cuatro variables como funciones del perfil medido. (Estas cuatro variables simulan la respuesta dinámica de un vehículo de referencia que viaja sobre el perfil medido). Las ecuaciones para las cuatro variables se resuelven para cada punto de elevación medido, excepto para el primer punto. La pendiente media durante los primeros 11 m (0.5 seg a 80 km / h) se utiliza para inicializar las variables asignando los siguientes valores:

$$Z'_1 = Z'_3 = \frac{(Y_a - Y_1)}{11} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$Z'_2 = Z'_4 = 0 \quad \text{Ecuación 33}$$

$$a = \left(\frac{11}{dx}\right) + 1 \quad \text{Ecuación 34}$$

donde:

- $Z_1', Z_2', Z_3'$  y  $Z_4'$  = son las cuatro variables
- $Y_a$  = representa la elevación del perfil a los 11 m.
- $Y_1$  = es la elevación en el primer punto.
- $dx$  = es el intervalo de muestreo.

Por ejemplo, si el intervalo  $dx = 0.25$  m, la Ecuación 32 será la diferencia de elevaciones entre el punto 45 y el punto 1 entre 11, debido a que la Ecuación 34 será:  $a = (11 / 0.25) + 1 = 45$ , y establecer una pendiente inicial para el cálculo del IRI usando los datos del perfil de estudio.

Para cada punto de elevación, desde 2 hasta "n" ( $n$  = número de elevaciones medidas), las siguientes cuatro ecuaciones son utilizadas:

$$Z_1 = S_{11} * Z'_1 + S_{12} * Z'_2 + S_{13} * Z'_3 + S_{14} * Z'_4 + P_1 * Y' \quad \text{Ecuación 35}$$

$$Z_2 = S_{21} * Z'_1 + S_{22} * Z'_2 + S_{23} * Z'_3 + S_{24} * Z'_4 + P_2 * Y' \quad \text{Ecuación 36}$$

$$Z_3 = S_{31} * Z'_1 + S_{32} * Z'_2 + S_{33} * Z'_3 + S_{34} * Z'_4 + P_3 * Y' \quad \text{Ecuación 37}$$

$$Z_4 = S_{41} * Z'_1 + S_{42} * Z'_2 + S_{43} * Z'_3 + S_{44} * Z'_4 + P_4 * Y' \quad \text{Ecuación 38}$$

dónde:

$$Y' = (Y_i - Y_{i-1}) / dx \quad \text{Ecuación 39}$$

- $Y'$  = pendiente de entrada
- $Z_1, Z_2, Z_3$  y  $Z_4$  = son los valores de las variables de estado para la posición actual
- $Z_1', Z_2', Z_3'$  y  $Z_4'$  = son los valores conocidos para la posición anterior.
- $S_{ij}$  y  $P_j$  son coeficientes que se fijan para un intervalo muestra dado.

Por lo tanto, de la Ecuación 35 a la Ecuación 38 se resuelven para cada posición a lo largo de la trayectoria de la llanta.

Los coeficientes  $S_{ij}$  y  $P_j$  son constantes que se encuentran en un arreglo para un intervalo de tiempo, donde el tiempo será el que necesite un vehículo para recorrer una distancia de un perfil en estudio para la velocidad de simulación. Estos coeficientes han sido calculados para cada intervalo de muestreo por el Banco Mundial (Sayers *et al.*, 1986), y en el apartado 4.6.2 se muestra el algoritmo transcrito al lenguaje Python para su de cálculo.

También para cada posición, la pendiente rectificada (RS) del perfil filtrado se calcula como:

$$RS_i = |Z_1 - Z_3| \quad \text{Ecuación 40}$$

El IRI estadístico es el promedio de la pendiente rectificada a lo largo del sitio. Por lo tanto, una vez resueltas las ecuaciones anteriores para todos los puntos del perfil, el IRI se calcula como (Sayers, Gillespie, & Paterson, 1986):

$$IRI = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=2}^n RS_i \quad \text{Ecuación 41}$$

## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 Introducción

En este capítulo se describen las características del modelo numérico idealizado que se implementará para realizar las simulaciones en Code Bright, partiendo con la recopilación de los datos climáticos necesarios para este tipo de problema (Termo-Hidro-Mecánico), los cuales se ubicaran sobre la autopista Pátzcuaro-Uruapan. Para la modelación es necesario definir la geometría del perfil a utilizar, las características del material, las condiciones de contorno, el tipo de malla y los intervalos de tiempo. Una vez planteada la estructura a analizarse, se han realizado estudios de sensibilidad del grado de compactación en el cuerpo del terraplén con el fin de observar el comportamiento de la estructura y la influencia que tiene en la generación de las deformaciones verticales, creando así, varios casos de estudio, con los cuales, se obtendrá el IRI a partir de los perfiles de deformación, así como los nuevos esfuerzos aplicados sobre el terraplén.

### 4.2 Datos atmosféricos

Dentro de las condiciones de frontera de flujo en Code\_Bright, el caso particular de las condiciones de frontera atmosférico es aplicable. La opción de condición de frontera atmosférico permite imponer condiciones de frontera en términos de evaporación, lluvia, radiación e intercambios de calor, simulando así las complejas interacciones suelo-atmósfera.

Estos fenómenos se expresan como condiciones de frontera de flujo para los tres componentes (agua, aire y energía) como funciones de las variables de estado (presión de líquido, presión de gas y temperatura del suelo) o variables dependientes (grado de saturación de líquido, fracción de agua en la fase gaseosa) y datos meteorológicos que varían en el tiempo.

Para poder llevar a cabo el propósito de esta investigación, es necesario contar con los datos climáticos de la zona para el estudio, la cual, se designó ubicarla sobre la

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

carretera Pátzcuaro–Uruapan, debido a que el material utilizado corresponde a esta zona. Los datos climáticos por utilizar son los presentados en la Tabla 3.

Tabla 3 Datos atmosféricos variables en el tiempo.

Variable atmosférica	Unidad	Columna usada
Temperatura atmosférica, $T_a$	° C	1-2
Presión atmosférica de gas, $P_{ga}$	MPa	3-4
Humedad relativa, $H_r$	-	5-6
Radiación, $R_n$	$J.m^{-2}.s^{-1}$	7-8
Índice de nubosidad, $I_n$	-	9-10
Precipitaciones, $P$	$kg.m^{-2}.s^{-1}$	11-12
Velocidad del viento, $v_a$	$m.s^{-1}$	13-14

Los datos se obtuvieron de diversas maneras. Los datos de las precipitaciones y temperaturas se obtuvieron del sistema meteorológico nacional de México de forma promedio diaria (Estación Zirahuen-Mich). Los demás parámetros climáticos se obtuvieron de la base de datos “Wolfram Alpha”, el cual nos dio la información de la estación meteorológica “General Francisco J. Mujica”, ubicada en Morelia, Michoacán.

Dado que los datos obtenidos fueron para un año (Promedios diarios) y que para este trabajo se consideró usar un tiempo de simulación de 5 años, por simplificación, se decidió repetir los mismos datos para el tiempo de estudio. En la Figura 25 se muestran las precipitaciones para los 5 años de estudio, señalando los periodos de lluvias y de secas.

# Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

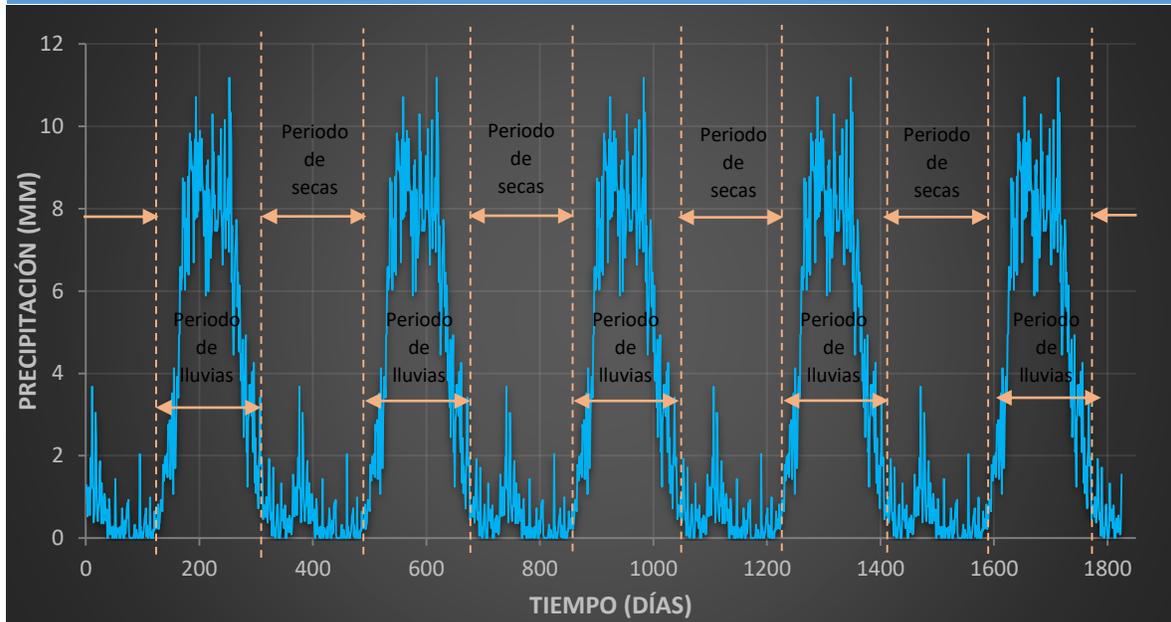


Figura 25 Precipitación promedio diaria utilizada para la investigación.

Con los datos obtenidos, se crea un archivo “root\_atm.dat”, donde cada par de columnas representa una variable climática de acuerdo con la Tabla 3. La primera columna de cada variable representa el tiempo y la segunda, el valor asignado para ese tiempo. En la Figura 26 se muestra el esquema del archivo “atm.dat”. En esta investigación se utilizó la opción de interpolación, lo que significa que Code Bright utilizará los datos proporcionados y procesará interpolaciones lineales para obtener el valor de una cantidad para un tiempo de cálculo dado.

1837	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.00E+00	12.75	0.00E+00	0.1	0.00E+00	0.65	0.00E+00	209.44	0.00E+00	0.42	0.00E+00	1.49E-05	0.00E+00	0.88
8.644E+04	12.62	8.644E+04	0.1	8.644E+04	0.53	8.644E+04	209.44	8.644E+04	0.42	8.644E+04	1.49E-05	8.644E+04	0.88
1.728E+05	12.55	1.728E+05	0.1	1.728E+05	0.52	1.728E+05	210.28	1.728E+05	0.42	1.728E+05	1.73E-05	1.728E+05	0.85
2.592E+05	12.52	2.592E+05	0.1	2.592E+05	0.62	2.592E+05	211.12	2.592E+05	0.42	2.592E+05	6.13E-06	2.592E+05	0.88
3.456E+05	12.77	3.456E+05	0.1	3.456E+05	0.62	3.456E+05	211.99	3.456E+05	0.42	3.456E+05	1.26E-05	3.456E+05	0.88
4.320E+05	13.02	4.320E+05	0.1	4.320E+05	0.62	4.320E+05	212.86	4.320E+05	0.42	4.320E+05	1.44E-05	4.320E+05	0.89
5.184E+05	12.95	5.184E+05	0.1	5.184E+05	0.51	5.184E+05	213.74	5.184E+05	0.41	5.184E+05	1.24E-05	5.184E+05	0.89
6.048E+05	12.55	6.048E+05	0.1	6.048E+05	0.61	6.048E+05	214.62	6.048E+05	0.41	6.048E+05	5.48E-06	6.048E+05	0.89
6.912E+05	12.37	6.912E+05	0.1	6.912E+05	0.61	6.912E+05	215.52	6.912E+05	0.41	6.912E+05	1.44E-05	6.912E+05	0.9
7.776E+05	12.65	7.776E+05	0.1	7.776E+05	0.61	7.776E+05	216.42	7.776E+05	0.4	7.776E+05	2.22E-05	7.776E+05	0.9
8.640E+05	12.71	8.640E+05	0.1	8.640E+05	0.6	8.640E+05	217.32	8.640E+05	0.4	8.640E+05	1.45E-05	8.640E+05	0.9
9.504E+05	12.68	9.504E+05	0.1	9.504E+05	0.6	9.504E+05	218.25	9.504E+05	0.4	9.504E+05	4.22E-05	9.504E+05	0.9
1.037E+06	12.51	1.037E+06	0.1	1.037E+06	0.6	1.037E+06	219.17	1.037E+06	0.4	1.037E+06	1.59E-05	1.037E+06	0.91
1.123E+06	12.22	1.123E+06	0.1	1.123E+06	0.6	1.123E+06	220.1	1.123E+06	0.35	1.123E+06	1.40E-05	1.123E+06	0.91
1.210E+06	12.47	1.210E+06	0.1	1.210E+06	0.59	1.210E+06	221.04	1.210E+06	0.35	1.210E+06	4.10E-06	1.210E+06	0.91
1.296E+06	12.62	1.296E+06	0.1	1.296E+06	0.59	1.296E+06	221.96	1.296E+06	0.35	1.296E+06	7.76E-06	1.296E+06	0.92
1.382E+06	12.45	1.382E+06	0.1	1.382E+06	0.59	1.382E+06	222.92	1.382E+06	0.35	1.382E+06	1.78E-05	1.382E+06	0.92
1.468E+06	12.15	1.468E+06	0.1	1.468E+06	0.59	1.468E+06	223.85	1.468E+06	0.35	1.468E+06	3.53E-05	1.468E+06	0.92
1.554E+06	12.14	1.554E+06	0.1	1.554E+06	0.59	1.554E+06	224.84	1.554E+06	0.35	1.554E+06	7.97E-06	1.554E+06	0.92

Figura 26 Esquema del Archivo DAT, con los datos climáticos obtenidos para la zona de estudio.

### 4.3 Terraplén bajo condiciones climáticas

Con el fin de llevar a cabo el objetivo de esta investigación, se simula un perfil longitudinal en Code Bright de un terraplén bajo condiciones atmosféricas y un esfuerzo aplicado en la superficie, el cual nos permitirá analizar el cambio en el perfil una vez finalizada la simulación. Este trabajo se ubicó sobre la autopista Pátzcuaro-Uruapan, en el estado de Michoacán, ya que los datos climáticos y los del material (Espinoza, 2014), se obtuvieron para esta zona.

#### 4.3.1 Geometría

En esta investigación, se empleó un perfil longitudinal del tramo carretero “CAYACO-HACIENDA VIEJA” del cadenamiento 23+465.10 al 23+772.38, ubicado en el municipio de La Huacana. Se utilizó este tramo carretero para las simulaciones porque se tuvo la facilidad de acceder a su proyecto geométrico.

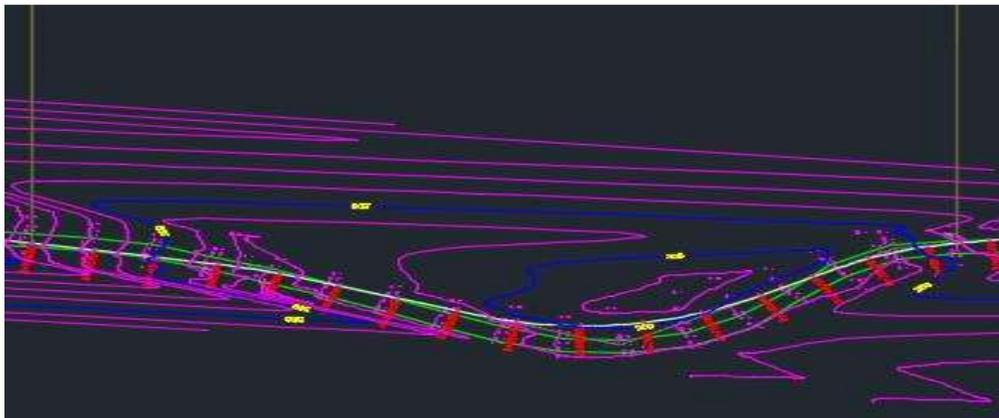


Figura 27 Topografía del tramo carretero.

En la Figura 27 observamos la topografía por el cual pasa el tramo, en ella se pueden observar las curvas de nivel, donde las líneas azules tiene una elevación de 200 m y cada línea rosa es un metro de diferencia. Se tiene una elevación mayor del lado izquierdo, la cual va en descenso hacia el lado derecho, esto lo podemos observar en el perfil de elevaciones de la Figura 28.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

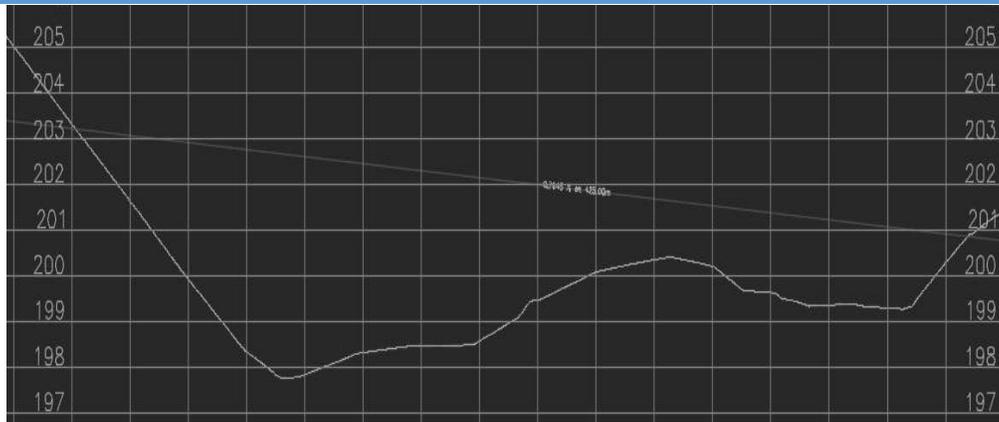


Figura 28 Perfil Longitudinal utilizado en las simulaciones.

El perfil tiene una longitud de 307.28 metros, la altura del terraplén varía a lo largo del perfil siendo su mayor altura de 4.85 metros, mientras que la menor es de 1.23 m. El perfil tiene una pendiente del -0.764%, sin embargo, para la simplificación del problema se optó por utilizar el perfil de manera horizontal.

### 4.3.2 Datos del problema

#### 4.3.2.1 Ecuaciones resueltas

Las ecuaciones diferenciales para la resolución del problema son el Equilibrio de esfuerzos (desplazamientos desconocidos,  $u$ ), Balance de masa de agua (presión de líquido,  $P_l$ ) y Balance de energía (temperatura) (Tabla 4), los cuales son capaces de evaluar los cambios en los procesos mecánicos (porosidad), térmicos (radiación, temperatura) e hidráulicos (precipitación) para los cuales se someterá el terraplén para la línea de tiempo a evaluar.

Tabla 4 Ecuaciones de balance resueltas.

Ecuación	Variable desconocida
<b>Equilibrio de esfuerzos</b>	Desplazamientos, $u$
<b>Balance de masa de agua</b>	Presión de líquido, $P_l$
<b>Balance de energía</b>	Temperatura, $T$

#### 4.3.3 Definición de los parámetros del material

Para la realización de este trabajo, es necesario definir los parámetros de los modelos constitutivos mecánicos, hidráulicos y térmicos del material. Para ello, se implementaron los datos obtenidos del trabajo de investigación de Espinoza (2014), donde se determinaron las características de un limo de alta compresibilidad, el cual es un suelo característico de la autopista Pátzcuaro-Uruapan, en el estado de Michoacán.

##### 4.3.3.1 Datos hidráulicos y térmicos

###### 4.3.3.1.1 Curva característica o de retención

La Curva de Retención es muy importante ya que proporciona buenas estimaciones de otros parámetros fundamentales de los suelos parcialmente saturados más difíciles de obtener en laboratorio, obteniéndolos de una manera relativamente fácil.

En la Figura 29 se muestra las curvas de retención del suelo en estudio, correspondientes a la ecuación de Van Genuchten para diferentes valores de porosidad y su correspondiente grado de compactación.

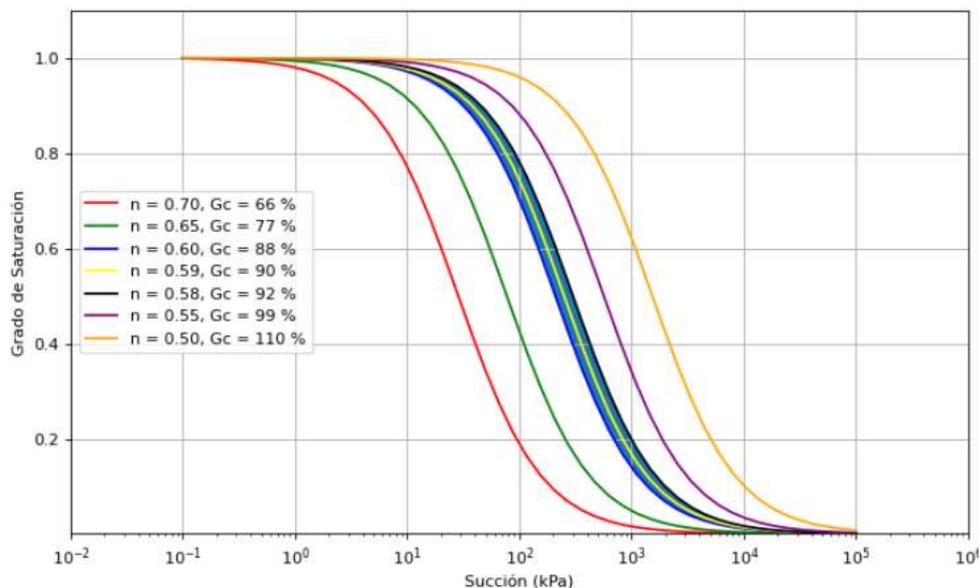


Figura 29 Curvas de retención para diferentes valores de porosidad y su correspondiente grado de compactación.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

El espacio rellenado corresponde a las curvas de retención de agua para los grados de compactación especificado en la norma N-CMT-1-01-16 ( $90\% \pm 2\%$  del  $G_c$ ).

En la siguiente tabla, se muestran los valores de la curva de retención utilizados en la investigación.

Tabla 5 Parámetros de la Curva de retención (Van Genuchten) del suelo de estudio.

Curva de retención con el modelo Van Genuchten		
$P_0$	MPa	0.250
$\sigma_0$	N/m	0.072
$\lambda$	-	0.35
$S_{rl}$	-	0.01
$S_{ls}$	-	1

### 4.3.3.1.2 Permeabilidad intrínseca

Está relacionada con la porosidad a través de la conocida ecuación de Kozeny:

$$k = k_0 \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \frac{(1 - \phi_0)^2}{\phi_0^3} \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde  $\Phi_0$  es la porosidad de referencia del suelo y  $k_0$  es la permeabilidad saturada en la porosidad de referencia  $\Phi_0$ .

Se define como el coeficiente que establece el grado para el cual un flujo puede atravesar un medio poroso. La permeabilidad intrínseca dependerá de las características del terreno de allí que sus unidades estén en referencia del área ( $\text{cm}^2$ ,  $\text{m}^2$ ) (manual de Code Bright).

En la Tabla 6, se muestran los valores de la permeabilidad intrínseca utilizados en la investigación.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Tabla 6 Parámetros de la Permeabilidad intrínseca del suelo de estudio.

Permeabilidad intrínseca		
$K_{11}$	$m^2$	$1.052e^{-15}$
$K_{22}$	$m^2$	$1.052e^{-15}$
$K_{33}$	$m^2$	$1.052e^{-15}$
$\phi$	-	<b>0.593</b>
$\phi_{min}$	-	<b>0.30</b>

### 4.3.3.1.3 Permeabilidad relativa para la fase líquida

El modelo de van Genuchten se emplea para predecir la variación de la permeabilidad intrínseca ( $k_{rl}$ ) con el grado efectivo de saturación de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$K_{rl} = \sqrt{S_e} \left( 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{\lambda}} \right)^{\lambda} \right)^2 = \frac{K(S_e)}{K_s} \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde  $K_s$  es la permeabilidad saturada intrínseca en  $m^2$ .

En la Tabla 7 se muestran los valores utilizados para este parámetro.

Tabla 7 Parámetros de Permeabilidad Relativa para la fase líquida del suelo de estudio.

Permeabilidad relativa de la fase líquida (Van Genuchten)	
$\lambda$	<b>0.35</b>
$S_{rl}$	<b>0.01</b>
$S_{ls}$	<b>1</b>

### 4.3.3.1.4 Permeabilidad relativa para la fase de gas

Para los valores de la permeabilidad relativa para la fase de gas se utiliza la siguiente ecuación por defecto:

$$k_{rg} = 1 - k_{rl} \quad \text{Ecuación 44}$$

#### 4.3.3.1.5 Flujos difusivos de vapor

Dado que en un medio poroso se encuentran las diferentes fases, se debe de reconocer la transferencia de materia independiente de la convección del medio al incluir la difusión molecular de vapor o aire en fase de gas.

La difusividad (Ley de Frick) es un parámetro de proporción entre la densidad del flujo y el gradiente que induce el movimiento aleatorio de las moléculas. La difusión molecular de vapor o aire en fase gaseosa está dada por la siguiente ecuación (manual de Code Bright):

$$D_a^i = D \left( \frac{(273.15 + T)^n}{P_g} \right) \quad \text{Ecuación 45}$$

donde  $P_g$  es la presión del gas en Pa, y  $D$  ( $5.9 \times 10^{-6}$  Pa m<sup>2</sup> /s K<sup>n</sup>) y  $n$  (2.3) son parámetros.

#### 4.3.3.1.6 Flujo conductor de calor

La conductividad térmica se utiliza en la ley de Fourier's para calcular el flujo conductor de calor.

### Conductividad térmica dependiente en la porosidad y la temperatura

$$\lambda_{dry} = \lambda_{soil}^{1-\phi} \lambda_{gas}^{\phi} \quad \text{Ecuación 46}$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_{soil}^{1-\phi} \lambda_{liq}^{\phi} \quad \text{Ecuación 47}$$

### Conductividad térmica dependencia al contenido de agua

La dependencia de la conductividad térmica del grado de saturación se puede considerar de la siguiente manera (Lineal con la raíz cuadrada de saturación):

$$\lambda = \lambda_{sat}\sqrt{S_l} + \lambda_{dry}(1 - \sqrt{S_l}) \quad \text{Ecuación 48}$$

En la siguiente tabla se presentan los valores de la conductividad térmica utilizados.

Tabla 8 Parámetros de Flujo conductor de calor del suelo de estudio.

Conductor de flujo de calor	
$\lambda_{dry}$	0.5
$\lambda_{sat}$	1

#### 4.3.3.2 Datos mecánicos

El programa Code Bright permite utilizar diferentes modelos constitutivos mecánicos. Para esta investigación, se implementó el modelo general basado en la teoría de Desai y Perzyna para suelos no saturados.

##### 4.3.3.2.1 Modelo general basado en la teoría de Desai y Perzyna

La teoría Elasto-visco-plástica de Perzyna se basa en las hipótesis usuales de descomposición de la deformación total en deformación elástica y deformación visco-plástica y en la relación entre deformación elástica y esfuerzo, es decir:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{vp} \quad \text{Ecuación 49}$$

$$\sigma = E : \varepsilon^e \quad \text{Ecuación 50}$$

Donde  $\varepsilon, \varepsilon^e, \varepsilon^{vp}$  representan las derivadas respecto al tiempo de la deformación total, elástica y visco-plástica, respectivamente;  $\sigma$  la derivada de la tensión respecto al tiempo y  $E$  el módulo de elasticidad.

$$E = E_0 + (\phi - \phi_0) \frac{dE}{d\phi} \geq E_{min} \quad \text{Ecuación 51}$$

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

En la Tabla 9 se describen los valores para estos parámetros.

Tabla 9 Parámetros del modelo de elasticidad lineal.

Elasticidad lineal (modelo de elasticidad lineal)			
$E$	MPa	Módulo de Young	50
$dE/d\phi$	MPa	Variación del módulo de Young con porosidad	-
$\nu$	-	El coeficiente de Poisson	0.30
$\phi_0$	-	Porosidad de referencia	-
$\phi_{min}$	-	Porosidad mínima	-
$E_{min}$	MPa	Módulo elástico mínimo	-
$b$	-	Coeficiente de Biot (valor predeterminado = 1)	-

Se presentan las principales ecuaciones del modelo general para suelos no saturados basados en la teoría de Desai (1992) y Perzyna (1996).

El flujo de deformación visco-plástica se define como:

$$\epsilon^{vp} = \Gamma \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial G}{\partial \sigma'} \quad \text{Ecuación 52}$$

$$\phi(F) = \left( \frac{F}{F_0} \right)^N \quad \text{Ecuación 53}$$

donde la función de fluencia se define como:

$$F(J_1, J_{2D}, J_{3D}, s) = aJ_{2D} - \mu^2 F_b F_s \quad \text{Ecuación 54}$$

con las siguientes funciones adicionales:

$$F_b = \gamma \left[ - (J_1^0(s) + k_2 s + k_4)^{2-n} (J_1 + k_1 s + k_4)^n + (J_1 + k_1 s + k_4)^2 - k_3 s J_1^0(s) \right] \quad \text{Ecuación 55}$$

$$F_s = (1 - \beta_s S)^m \quad \text{Ecuación 56}$$

$$S = \frac{\sqrt{27}}{2} J_{3D} (J_{2D})^{(-3/2)} \quad \text{Ecuación 57}$$

El potencial visco-plástico está definido similarmente como:

$$G(J_1, J_{2D}, J_{3D}, s) = a J_{2D} - b \mu^2 F_b F_s \quad \text{Ecuación 58}$$

donde  $b$  es un parámetro que introduce la no asociatividad.

El endurecimiento se describe con la siguiente función, que es equivalente al modelo BBM:

$$J_1^0(s) = 3p^c \left( \frac{J_1^{0*}}{3p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-k}{\lambda(s)-k}} \quad \text{Ecuación 59}$$

$$p_0(s) = J_1^0(s)/3 \quad \text{Ecuación 60}$$

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1 - r) \exp(-\beta s) + r] \quad \text{Ecuación 61}$$

La succión y los esfuerzos netos están definidos como:

$$s = \max((P_g - P_l), 0) \quad \text{Ecuación 62}$$

$$\sigma_n = \sigma_n^{total} - \max(P_g - P_l) \quad \text{Ecuación 63}$$

Y las invariantes son:

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) = p - \max(p_g, p_l) = \frac{J_1}{3} - \max(p_g, p_l) \quad \text{Ecuación 64}$$

$$J_{2D} = \frac{1}{2} \text{trace}(s:s) = \frac{1}{3} q^2 \quad \text{Ecuación 65}$$

$$s = \sigma' - p'I \quad \text{Ecuación 66}$$

El endurecimiento depende de la deformación volumétrica visco-plástica de acuerdo con:

$$dJ_1^{0*} = \frac{1+e}{(\lambda(0)-\kappa)} J_1^{0*} d\varepsilon_v^{vp} \leftrightarrow dp_0^* = \frac{1+e}{(\lambda(0)-\kappa)} p_0^* d\varepsilon_v^{vp} \leftrightarrow \frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{1+e}{\chi(0)} d\varepsilon_v^{vp} \quad \text{Ecuación 67}$$

Notar que usando  $k_1=3k$ ,  $k_2=3k$ ,  $k_3=0$ ,  $k_4=0$  y  $F_s=1$ , resulta:

$$F(q, p, s) = a \frac{1}{3} q^2 - \mu^2 \gamma 3^2 [-(p_0(s) + ks)^{2-n} (p + ks)^n + (p + ks)^2] \quad \text{Ecuación 68}$$

De la misma forma el potencial visco-plástico se describe como:

$$G(q, p, s) = a \frac{1}{3} q^2 - b \mu^2 \gamma 3^2 [-(p_0(s) + ks)^{2-n} (p + ks)^n + (p + ks)^2] \quad \text{Ecuación 69}$$

La resistencia puede ser considerada también como función de succión en la siguiente forma:

$$\mu(s) = \mu_{DRY} - (\mu_{DRY} - \mu_{SAT}) \left( \frac{\mu_{SAT}}{\mu_{DRY}} \right)^S \quad (\mu_{SAT} < \mu_{DRY}) \quad \text{Ecuación 70}$$

En las siguientes tablas (Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12), se muestran los valores utilizados para el modelo descrito.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Tabla 10 Parámetros Visco-plásticos.

Visco-plasticidad (modelo general basado en la teoría de Desai y Perzyna)			
$\Gamma_0$	$s^{-1}$	1 / Viscosidad	1000
N	-	Potencia de la función de estrés (valor entero)	5
$F_0$	MPa	Fo=1 Mpa	1
$\delta$	-	$\Gamma = \Gamma_0 \exp(\delta s)$	-
$b$	-	Parámetro de no asociatividad.	0.3

Tabla 11 Parámetros para función de rendimiento y potencial plástico.

Parámetros para función de rendimiento y potencial plástico			
$n$	-	Potencia en F y G (valor entero)	1
$\gamma$	-	Parámetro en F y G	-0.111
$\beta_s$	-	Valor típico 0 (entonces $F_s = 1$ y no se considera J3D)	0
$m$	-	Valor típico -0,5, solo necesario si $\beta_s \neq 0$	0
$\mu_{DRY}$	-	Para algunos casos, $\mu = M_{DRY}$ correspondiente aproximadamente al modelo Cam-Clay.	0
-	-	-	0
$(J_1^{0*})_F$	MPa	Valor positivo, tamaño inicial de F	0.375
$(J_1^{0*})_G$	MPa	Valor positivo, tamaño inicial de G	0.375
$a$	-	Parámetro en F y G	3
$\mu_{SAT}$	-	Para algunos casos $\mu = MSAT$ correspondiente aproximadamente al modelo Cam-Clay.	0.85

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Tabla 12 Parámetros de la curva LC.

Parámetros de la curva LC			
$k$	-	Parámetro de compresión visco-plástica	0.00944
$\lambda(0)$	-	Parámetro de compresión visco-plástica	0.1208
$r$	-	Parámetro en curva LC	6.2
$\beta$	-	Parámetro en curva LC	1.24
$p^c$	MPa	Parámetro en curva LC	0.98
$k_1$	-	-	0
$k_2$	-	-	-0.301
$k_3$	-	-	0.301
$k_4$	-	-	0

### 4.3.4 Condiciones

Las condiciones necesarias para la simulación se describen a continuación.

#### 4.3.4.1 Condiciones iniciales desconocidas

Las condiciones iniciales desconocidas se asignarán a la superficie de la figura del perfil longitudinal con una distribución espacial constante; en esta se prescriben los desplazamientos (en las direcciones X, Y y Z), la presión del líquido, la presión del gas y la temperatura inicial del material.

Los desplazamientos se dejan predeterminados (en cero); la presión del líquido inicial asignada es de -0.1 MPa, de acuerdo con la curva de retención del material, que es el valor para la succión y, por último, se define la temperatura igual a 20 °C.

#### 4.3.4.2 Esfuerzo inicial

Para establecer un estado de esfuerzo inicial inexistente para el terraplén, se establece -0.01 MPa (se simula la construcción que conduce al equilibrio de

## Quantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

esfuerzos dado por el peso). Se asigna en la superficie de la figura del perfil longitudinal.

### 4.3.4.3 Porosidad inicial

La porosidad inicial asignada al material fue la correspondiente al 90 % del Grado de compactación, es decir, de 0.593. El programa Code Bright asigna este valor de porosidad de manera homogénea en toda la superficie de la figura.

### 4.3.4.4 Condición de límite de fuerza / desplazamiento

Se debe establecer la restricción para los desplazamientos horizontales y verticales en la base del perfil con el fin de resolver el problema. Esto se logra estableciendo en 1 los campos de “dirección Y prescrita” y “dirección X prescrita”, y asignándole esta condición en las líneas de la base del perfil.

Para este trabajo de investigación se realizaron simulaciones con distintos esfuerzos aplicados en la superficie del perfil. Los esfuerzos utilizados fueron de 0.35 MPa y 0.569 MPa, los cuales se aplicaron en primera instancia como una condición de “Carga/Esfuerzo creciente (-Dfy)” (intervalo de tiempo 2) y después como una condición de “Fuerza/Esfuerzo en la dirección Y” (intervalo de tiempo 3). Se realizó de esta manera con el fin de que el programa converja de manera más eficiente. En la Tabla 13, se presenta la simbología utilizada en la Figura 30.

Tabla 13 Representación de las condiciones de límite de fuerza / desplazamiento aplicadas.

Condición	Representación
Restricción de los desplazamientos (Sentido X y Y)	
Aplicación de “Carga/esfuerzo creciente (Dfy)”	
Aplicación de “Fuerza/esfuerzo (dirección Y)”	

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

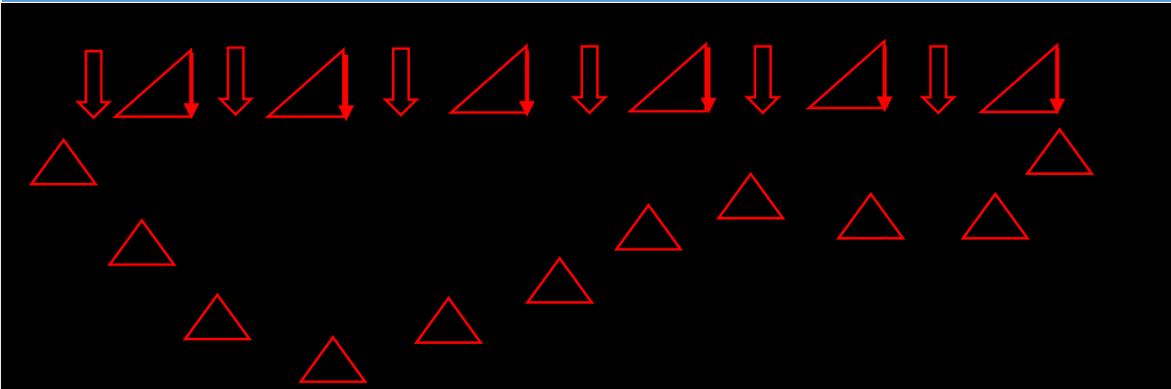


Figura 30 Representación gráfica de la aplicación de las condiciones de límite de fuerza / desplazamiento.

### 4.3.4.5 Condición límite de flujo

En esta investigación se consideró implementar el nivel freático como condición de frontera de flujo en la parte inferior del perfil.

### 4.3.4.6 Condición atmosférica

La condición de flujo de entrada en la superficie debido a las acciones climáticas se establece en la línea superior del perfil longitudinal. Esto permite incluir cambios en el balance de masa de agua y energía para los cambios inducidos por los factores climáticos, bajo los términos de evaporación, precipitación, radiación e intercambios de calor, simulando así las complejas interacciones suelo-atmósfera

La información inicial incluye los términos necesarios para cálculos de radiación, caudales de entrada al terraplén específicos para la zona de estudio y la estimación de la evaporación y los flujos de energía. Los Datos ingresados para esta condición se presentan a continuación en las tablas.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Tabla 14 Parámetros atmosféricos de la zona de estudio.

Latitud (rad), $\lambda$	0.33958
Hora en que comienza el otoño (s), $t_s$	22,982,400
Tiempo al mediodía (s), $t_m$	43,200
Longitud de rugosidad (m), $z_0$	0.02
Altura de pantalla (m), $z_a$	1.5
Factor de estabilidad (-), $\phi$	1
Densidad de gas atmosférico (kg.m-3), $\rho_{ga}$	1.2
Albedo seco (-), $A_d$	0.2
Albedo húmedo (-), $A_w$	0.2
Gamma de gas, kg/m <sup>2</sup> /s/Mpa	1e <sup>6</sup>
Gamma del líquido, kg/m <sup>2</sup> /s/Mpa	-1e <sup>6</sup>
Factor multiplicador de la precipitación	1
Factor multiplicador de la radiación	1
Factor multiplicador de la evaporación	1
Tipo de radiación	3
Fracción de la vegetación	0

Además, es necesario crear un archivo ASCII llamado root\_atm.dat con los datos atmosféricos que varían en el tiempo, necesarios para calcular los flujos de masa y calor, como se mencionó en el apartado 4.2. En la Tabla 15, se presenta la simbología de las condiciones de frontera que se utiliza en el perfil de la Figura 31.

Tabla 15 Representación de las condiciones de límite de flujo.

Condición	Representación
Condición de flujo "Nivel freático"	
Condición de flujo atmosférica	

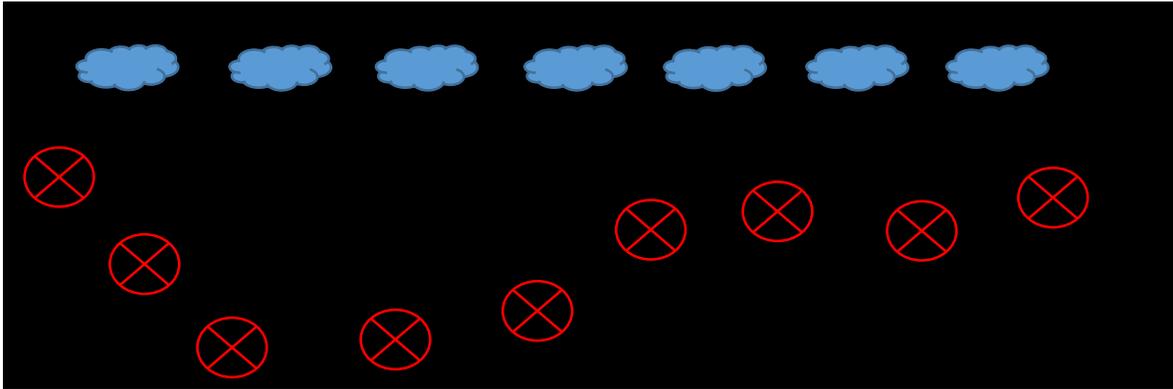


Figura 31 Representación gráfica de la aplicación de las condiciones límite de flujo.

#### 4.3.5 Intervalos de tiempo

Se definen distintas etapas en el tiempo para la simulación, estas se describen a continuación:

##### **Intervalo de tiempo 1**

En este tipo de modelo donde las condiciones atmosféricas son unos de los parámetros más importantes y los cuales los componentes varían en la línea de tiempo de estudio, se definen primero un intervalo de estudio en equilibrio, en el cual se establezcan todas las variables iniciales. En este mismo intervalo se selecciona la opción de volver los desplazamientos a 0.

##### **Intervalo de tiempo 2**

Se crea un segundo intervalo de tiempo, el cual copia todas las condiciones anteriormente descritas y se asigna una condición de “Carga/Esfuerzo creciente (-Dfy)”.

##### **Intervalo de tiempo 3**

En un tercer intervalo de tiempo se vuelven a copiar todas las condiciones del intervalo anterior, modificando la condición de “Carga/ Esfuerzo creciente (-Dfy)” a una condición de “Fuerza/Esfuerzo (-Y)” con un valor constante. Además, en este intervalo se incorporan las condiciones climáticas.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

En la Tabla 16 se describen los intervalos de tiempo.

Tabla 16 Intervalos de tiempo.

Intervalo	Inicio (Segundos)	Final (Segundos)	Paso de tiempo inicial	Condición de esfuerzo en la parte superior	Flujo aplicado en la parte superior
1	-86,400	0	0.01	-	-
2	0	604,800	0.01	Carga/Esfuerzo creciente (-Dfy)	-
3	604,800	157,680,000	0.01	Fuerza/Esfuerzo (-Y)	Condición atmosférica

### 4.3.6 Generación de la malla

La generación de la malla de la superficie de la figura del perfil longitudinal se describe por medio de elementos cuadriláteros, donde el tamaño de los elementos se designó como 0.5 m; la malla se refinó en la parte superior haciendo que los cuadriláteros que se tienen en la línea superior tuvieran una longitud de 0.25 m, ya que es de interés para la investigación obtener la información en los nodos de los elementos a esta distancia para la posterior obtención del IRI.

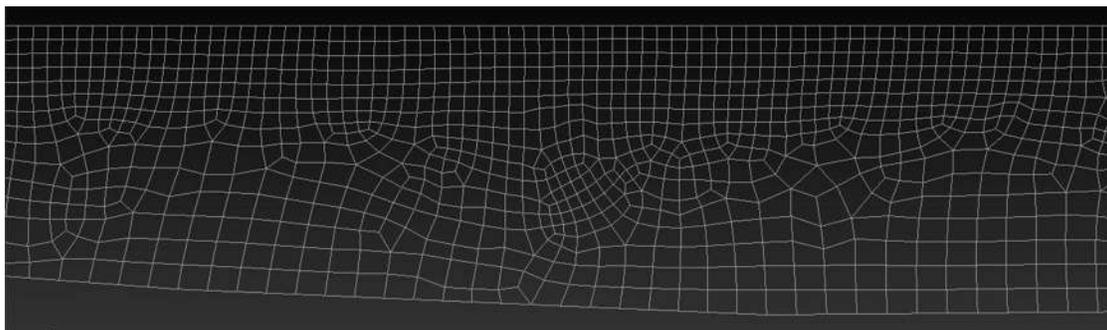


Figura 32 Detalle del mallado del perfil.

El número de nodos y de elementos se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17 Valores de la malla

Malla Generada	
Número de elementos cuadriláteros	9336
Numero de nodos	10259

#### 4.4 Generación de la porosidad en base a variogramas

Una vez realizada la simulación de acuerdo con lo descrito en el apartado anterior, y con el fin de analizar diferentes modelos con condiciones de variabilidad de compactación en el espacio, se realiza un estudio de sensibilidad del grado de compactación. Para esto, se modifica la porosidad del material utilizado, debido a la relación que la porosidad tiene con el grado de compactación. La modificación de la porosidad se realiza por medio de un programa creado en Python el cual modifica el archivo “gri.dat”

En el archivo “gri.dat” se describe los nodos (número, coordenadas y tipo de condición de frontera), la conectividad de nodo (tipo de material, tipo de elemento y conectividades globales), las condiciones iniciales de las incógnitas, los valores iniciales de los esfuerzos y la porosidad en los elementos (manual de Code Bright).

El programa creado en Python consiste en utilizar la librería gstools (Müller & Schüler. GeoStat-Framework) que proporciona las herramientas de geoestadísticas necesarias para la generación de campos aleatorios. En este trabajo, se genera un campo o mapa de porosidades aleatorias de forma rectangular, el cual tiene dimensiones mayores que la sección utilizada (Figura 33). Para la creación de este mapa, se implementó el modelo del variograma gaussiano, el cual queda definido de la siguiente manera (Webster, 2007):

$$\gamma(r) = \sigma^2 \left( 1 - \exp \left( - \left( s * \frac{r}{l} \right)^2 \right) \right) + n \quad \text{Ecuación 71}$$

Donde está el factor de cambio de escala estándar  $s = \sqrt{\pi}/2$ .

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Para este modelo es necesario definir ciertos parámetros, los cuales condicionan la creación del variograma y, se mencionan a continuación:

- La media del modelo (**mean**): para este caso se define la media de la porosidad, es decir, 0.593, que es igual al 90% del grado de compactación del material.
- Dimensión del modelo (**dim**): La dimensión en que se realizó el trabajo fue en 2D.
- La varianza (**var**): la varianza es igual a 0.0005. Esta corresponde a una desviación estándar del 5 % del grado de compactación, es decir, 0.0224 de la porosidad. Se eligió esta desviación estándar para el estudio debido a que es el valor más crítico de acuerdo con varios estudios (Sherman, Watkins, & Prysock, 1967) (Davis, 1953).
- Pepita del modelo (**nugget**): Se considera igual a 0.
- El ángulo de rotación (**ángulos**): es igual 0, esto debido a que las capas se consideran en dirección horizontal.
- Escala de longitud del modelo (**len\_scale**): En esta investigación se asignaron diferentes valores para las direcciones principales (X, Y). En el siguiente apartado se describen los valores utilizados.

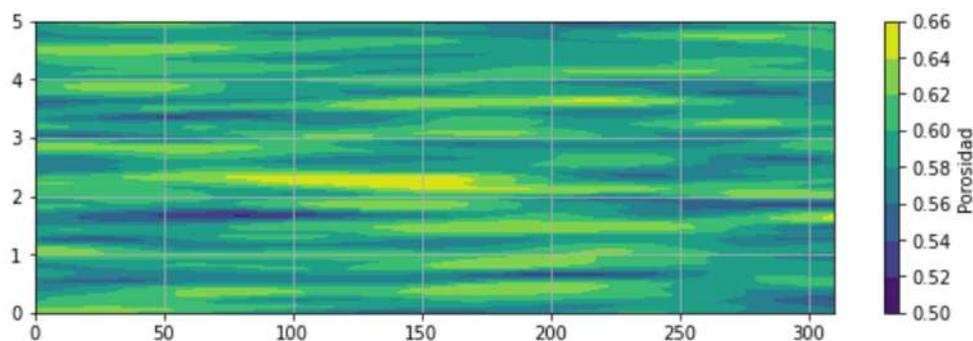


Figura 33 Mapa variográfico de las porosidades (Escala de la longitud X=50 metros, Y=0.10 metros). Dimensión de 310 metros en X y 5 metros en Y.

Una vez generado el mapa con las porosidades aleatorias, el programa localiza los elementos de la malla de la figura con sus respectivos centroides. Conociendo la ubicación de los centroides de los elementos de la malla, se interpolan los valores

en el mapa variográfico y se le asigna el nuevo valor de porosidad a cada elemento. Por último, se genera un nuevo archivo “gri.dat” con las porosidades modificadas.

Una vez generado el nuevo archivo “gri.dat”, se descarga y se sustituye dentro de la carpeta de archivos del modelo. Además, es necesario incorporar dentro de la carpeta de archivos del modelo la aplicación de Code Bright, que en este trabajo se utilizó la versión Cb\_v9\_1\_3, ya que se debe de correr el programa desde esta carpeta de archivos, de lo contrario, el programa GID no reconoce las modificaciones.

En el ANEXO 1 se presenta el programa para la generación de las porosidades aleatorias.

#### 4.5 Casos de estudio

Para la realización de esta investigación se llevaron a cabo diversas simulaciones considerando 2 Variantes para cada caso de estudio. Estas variantes son los esfuerzos aplicados en la superficie del perfil, los cuales fueron de 0.35 MPa (variante 1) y 0.569 MPa (variante 2). Al utilizar diferentes esfuerzos, se podrá analizar cómo influyen estos en cada caso presentado y, además, analizar la influencia de incrementar el esfuerzo aplicado, realizando una comparativa en los perfiles al final de su simulación.

Las primeras simulaciones se realizaron con el esfuerzo de 0.35 MPa con el fin de analizar el comportamiento del modelo. El esfuerzo de 0.569 MPa es derivado de la simulación de la aplicación directa de la carga de una llanta de un eje equivalente al perfil longitudinal. En la realidad, los esfuerzos varían a lo largo del camino, pero en esta investigación, la aplicación de los esfuerzos se asume que es de manera uniforme a lo largo del perfil, por simplificación.

Como punto de partida se realiza la simulación del terraplén sin porosidad aleatoria (CASO 1), el cual se encuentra descrito en el apartado 4.3. En seguida, se realizan

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

más simulaciones en las cuales se modifican la porosidad por medio de variogramas como se menciona en el apartado anterior.

Los parámetros que se modificaron dentro de la generación de porosidades mediante mapas variográficos fueron la longitud de la escala en el sentido X y la longitud de la escala en el sentido Y. Se consideran varias condiciones de continuidad de porosidad en el espacio, las cuales, presentan sus valores en la Tabla 18 para cada caso de estudio.

Tabla 18 Resumen de los casos estudiados

Casos	Longitud X (metros)	Longitud Y (metros)
1	Sin Porosidad Aleatoria	
2	16	0.05
3	24	0.05
4	33	0.05
5	41	0.05
6	50	0.05
7	50	0.10
8	50	0.15
9	50	0.20
10	50	0.25
11	50	0.30

Como se puede observar en la tabla anterior, se generaron dos grupos de casos de estudio, uno donde la Longitud Y (0.05 metros) se mantiene constante y la Longitud X es la que varía su distancia; y otro donde la Longitud X se mantiene constante (50 metros) y la Longitud Y varía en su distancia. Esto se realiza con la intención de observar y analizar los perfiles longitudinales cuando tienen diferentes distancias de continuidad de porosidad en el espacio, debidas al proceso de compactación en campo.

#### 4.6 Cálculo del IRI

El cálculo del Índice de Regularidad Internacional se realiza por medio de un programa creado en Python, el cual es adaptado del programa “BASIC” que propone el Banco Mundial, a partir del levantamiento topográfico de un tramo carretero (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986).

En la Figura 34 se muestra el programa para el cálculo del IRI, el cual está basado en el método descrito en el apartado 3.4.3 Para la ejecución del programa es necesario importar las librerías “numpy” y “matplotlib.pyplot”.

El programa comienza estableciendo los valores de las constantes de la matriz ST y PR. La matriz ST es la matriz de transición de estado que contiene los coeficientes  $S_{ij}$  de la Ecuación 35 a la Ecuación 38, y PR contiene los coeficientes  $P_j$  usados en esas ecuaciones. Estos coeficientes se obtienen por medio de otro algoritmo que se describe más adelante, o en el Documento técnico del Banco Mundial número 46 (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986).

Después se define una función, en la cual, las variables de entrada son:

- Las cotas “Ys” (mm)
- El número de intervalos “n”
- La longitud del intervalo “dx” (m)

La longitud del intervalo se estableció como 0.25 m debido a que el Banco Mundial indica que se tiene mejor precisión de las deformaciones en el pavimento (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986).

Después, se crea un arreglo de “ceros” del tamaño de “n” para las variables, Pendiente rectificada “RSi”, Desplazamientos “Desplaza”, “IRI” y “Yp”.

Enseguida, resuelve la Ecuación 32 a la Ecuación 34, y se genera un arreglo con las cuatro variables obtenidas “Z1 ( $Z_1'$ ), Z2 ( $Z_2'$ ), Z3 ( $Z_3'$ ) y Z4 ( $Z_4'$ )” llamado “Zsp”.

Se genera un “ciclo for”, el cual tiene la longitud del número de cotas o elevaciones que se ingresen; este ciclo funciona calculando como entrada la pendiente “Yp”,

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

después se resuelve de la Ecuación 35 a la Ecuación 38 guardando la información en la variable “Zi” que a su vez se convierte en el nuevo arreglo “Zsp”.

El cálculo de “RSi” se realiza con la Ecuación 40 para cada punto y esta es acumulativa, es decir, se irán sumando las “RSi” obtenidas de los puntos anteriores al punto actual; después se multiplica “RSi actual” por “dx” para obtener el desplazamiento (“Desplaza”) en el punto actual y por último, para obtener el “IRI” simplemente se dividen las “RSi” entre la Longitud del punto actual.

Este proceso se repite para cada punto hasta finalizar en la longitud de cotas o elevaciones, resultando en la obtención de los Desplazamientos y el IRI del perfil longitudinal analizado.

Para facilitar el ingreso de las cotas o elevaciones de los perfiles en el algoritmo, se crea un archivo “Nombre\_del\_archivo.prn” el cual contiene las elevaciones del perfil en forma de columna en unidades de milímetros.

### 4.6.1 Programa para calcular IRI

En la Figura 34 se muestra un programa de computadora de demostración para realizar cálculos de IRI. El programa está escrito en PYTHON.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#Calcular Constantes
ST=np.array([[0.9966071,0.01091514,-0.002083274,0.0003190145],
            [-0.5563044,0.9438768,-0.8324718,0.05064701],
            [0.022153176,0.002126763,0.7508714,0.008221888],
            [3.335013,0.3376467,-39.12762,0.4347564]])
PR=np.array([0.005476107,
            1.388776,
            0.2275968,
            35.79262])

def CalculoIri(Ys,n,dx): # Ys son las cotas, n el número de
intervalos y dx la longitud del intervalo
    RSi=np.zeros(n)
    Desplaza=np.zeros(n)
    IRI=np.zeros(n)
```

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

```
Yp=np.zeros(n)
Z1=(Ys[(11*4)]-Ys[0])/11
Z2=0
Z3=Z1
Z4=0
RSi[0]=0
a = (11/dx) + 1;
# Calculo de las pendientes
Zsp=np.array([Z1,Z2,Z3,Z4])

for i in range(1,len(Ys)):
    Yp[i]=(Ys[i]-Ys[i-1])/dx
    Zi=np.matmul(ST,Zsp)+PR*Yp[i]
    Zsp=Zi
    RSi[i]=RSi[i-1]+np.abs(Zi[0]-Zi[2])
    Desplaza[i]=RSi[i]*dx
    IRI[i]=RSi[i]/i

return Desplaza,IRI
```

Figura 34 Programa para el cálculo del IRI en Python.

### 4.6.2 Programa de cálculo de coeficientes para las ecuaciones IRI.

Los Coeficientes usados de la Ecuación 35 a la Ecuación 38 se pueden determinar para cualquier intervalo de perfil utilizando el programa que se muestra en la Figura 35, el cual está basado en el Documento técnico del Banco Mundial número 46 (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986). Estos coeficientes se derivan de las propiedades dinámicas del modelo de vehículo de referencia. ST es una matriz de 4 x 4 que describe la dinámica del modelo y PR es un vector de 4 x 1 que describe cómo interactúa el perfil con el vehículo.

```
import math
import numpy as np

K1=653
K2=63.3
C=6
u=0.15
dt=0.01124 # Segundos para dx=250 mm
MA=np.array([[0,1,0,0],
             [-K2,-C,K2,C],
```

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

```
[0, 0, 0, 1],
[K2/u, C/u, -(K1+K2)/u, -C/u]])

B=np.array([[0],[0],[0],[K1/u]])

ST=np.identity(4)+MA*dt

for pw in range(2,21):
    ST+=np.linalg.matrix_power(MA, pw)*dt**(pw)/math.factorial(pw)

print('ST=',ST)
PR=np.matmul(np.matmul(np.linalg.inv(MA), (ST-np.identity(4))),B)
print('PR =',PR)
```

Figura 35 Rutina del cálculo de los coeficientes

### 4.6.3 Entrada de prueba para verificar el cálculo.

El Banco Mundial propone la entrada de un pulso triangular para comprobar que el programa para calcular el IRI a partir del perfil es válido. Comienza en  $x = 1$  m, aumenta a un valor de 2 en  $x = 3$  m, luego disminuye de nuevo a 0 a  $x = 5$  m. Debido a que el IRI es el resultado de promediar, su valor disminuirá cuando no haya una entrada de rugosidad continua, como se muestra en la Figura 37. En esta figura la escala de lado izquierdo corresponde a la del perfil de entrada (línea negra) y los desplazamientos (línea roja); mientras que la escala del lado derecho corresponde al IRI (línea azul).

Esta verificación solo se puede utilizar para confirmar que el método de cálculo es válido (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986).

```
x=np.linspace(0,30,int(30/0.25)+1)
Ys1=x[0:5]*0
Ys2=x[5:13]-1
Ys3=5-x[13:21]
Ys4=x[21:]*0
Ys=np.append(np.append(np.append(Ys1,Ys2),Ys3),Ys4)

Desplaza,IRI=CalculoIri(Ys,len(Ys),0.25)
```

Figura 36 Datos utilizados para la comprobación del programa de cálculo IRI (Sayers, Gillespie & Paterson, 1986).

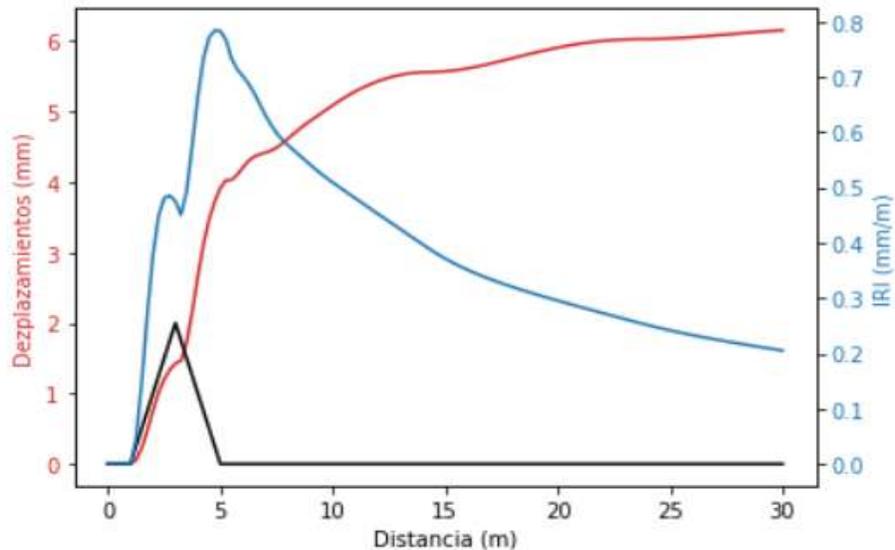


Figura 37 Entrada de perfil especial utilizada para verificar el programa de cálculo IRI.

#### 4.7 Cálculo de esfuerzos aumentados

Una vez realizadas las simulaciones, se obtendrán nuevos perfiles longitudinales con variación en sus deformaciones verticales y con ello, nuevos esfuerzos aplicados sobre el terraplén.

En este trabajo, se realiza el cálculo de “los esfuerzos aumentados” con base en modelo cuarto de carro, con el fin de analizar la influencia de las deformaciones en relación con los esfuerzos aplicados sobre la superficie del perfil. Esto se realiza obteniendo los desplazamientos en cada punto y utilizando los parámetros  $K_1$ ,  $m_2$ , y  $M$ , que son las constantes del modelo cuarto de carro.

En la Figura 38, se muestra el algoritmo utilizado para el cálculo de los esfuerzos a partir del nuevo perfil.

```
u=Desplaza[1:]-Desplaza[0:-1]
plt.plot(u)

K1=653 #s-2
m2=3565.22 # kg
k1=K1*m2 # kg/s2
```

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

```
FT=((-k1*((u)/1000)))/1000 # kg*m/s^2 = N (N/1000)= kN
FT
plt.plot(x[1:],FT/0.070/1000)
np.savetxt('myfile.txt', np.c_[x[1:],FT/0.070/1000])
```

Figura 38 Algoritmo para el cálculo de los esfuerzos aumentados a partir del Nuevo perfil.

## 5 RESULTADOS

El programa Code Bright presenta los resultados de las simulaciones realizadas de diferente forma. Para esta investigación el interés principal recae en la evolución de los desplazamientos verticales del perfil longitudinal a través del tiempo. Por ello, una vez finalizada las simulaciones, se obtuvieron los perfiles de desplazamientos para cada año, con el propósito de analizarlos. Otro aspecto importante por considerar dentro de esta investigación es la infiltración en el terraplén, por lo que se obtuvieron los datos de la evolución del grado de saturación y la presión del líquido en el tiempo.

### 5.1 Simulaciones con Variante 1 ( $\sigma = 0.35$ MPa)

Los primeros casos en analizarse fueron a los cuales se les aplicó un esfuerzo vertical de 0.35 MPa y a continuación se presentan los resultados obtenidos para esta variante.

#### 5.1.1 Caso 1 (Sin porosidad aleatoria)

En la Figura 39 se muestra la evolución del perfil para la simulación en la que no se modificó la porosidad, es decir, el modelo se ejecutó directamente del programa GID, con una porosidad de 0.593.

Se observan 4 puntos en los cuales la deformación vertical es mayor, estos puntos están en los cadenamientos de 0+020 (Espesor inicial de 1.5 m), 0+191 (Espesor inicial de 1.5 m), 0+223.75 (Espesor inicial de 1.49 m) y 0+290.5 (Espesor inicial de 1.46 m), donde se presenta la deformación vertical máxima en el último año de -46.55 mm en el cadenamiento 0+191. En estos “puntos”, la evolución de la deformación vertical en el tiempo es mínima, pues el mayor colapso ocurre en el primer año de la simulación.

En el perfil original, se tiene el mayor espesor (4.5 m) ubicado en el cadenamiento 0+068.75, en este punto se registró una deformación de -28.08 mm (en el año 5);

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

por otro lado, el espesor más pequeño tiene 1.24 m y está en el cadenamiento 0+204.5, en este punto, la deformación registrada fue de -33.81 mm.

La evolución de la deformación vertical en el tiempo es más evidente en los tramos de 0+50 a 0+120 y de 0+228 a 0+290.5. En el segundo tramo es más evidente como se deforma el perfil en el tiempo; este tramo comienza con un espesor de 1.7 m en el cadenamiento 0+228 y termina con un espesor de 1.46 m en el cadenamiento 0+290.5. Este es un tramo que se mantiene casi constante en su espesor, sin embargo, es donde se puede observar con mayor claridad la evolución de las deformaciones verticales del perfil en el tiempo.

El IRI obtenido para el primer año de análisis fue de 0.87 mm/m y al final del tiempo de análisis fue de 0.803 mm/m, reduciéndose así un 7.70%. Esta reducción no fue de manera lineal, siendo la mayor reducción la ocurrida del año 1 al año 2 con un 2.26%, después del año 2 al año 3 fue de 1.95%, del año 3 al año 4 de 2.07% y del año 4 al año 5 de 1.03%.

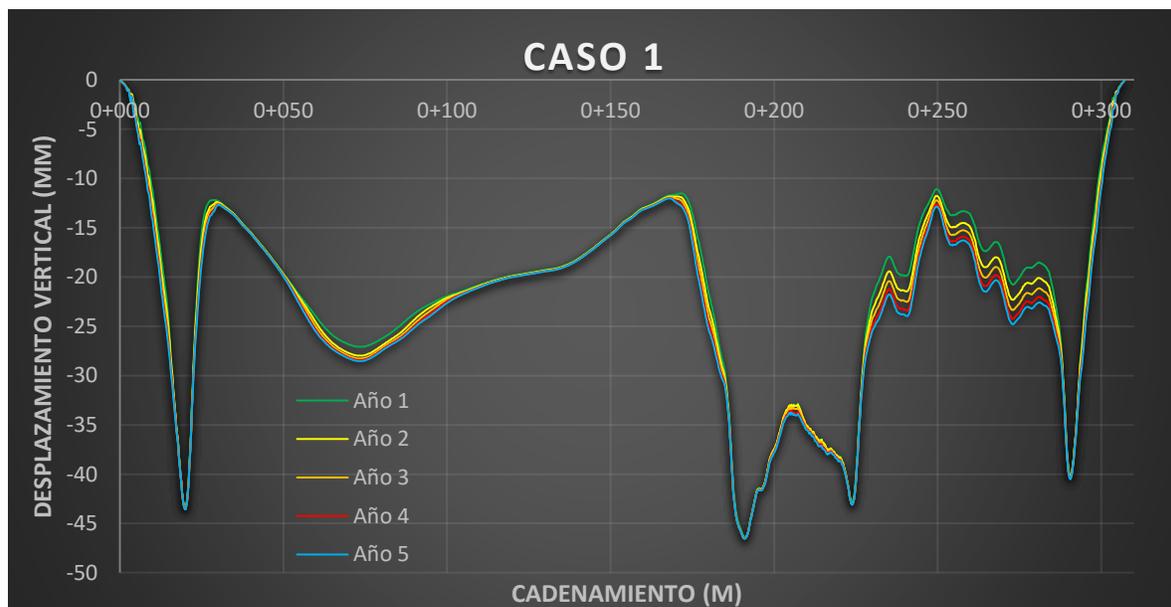


Figura 39 Evolución del perfil para la condición sin porosidad aleatoria.

### 5.1.2 Caso 2 (Long= 16, Esp=0.05)

En la Figura 40 se observa los perfiles obtenidos para el CASO 2. Se observa que al igual que el CASO 1, se generan cuatro “puntos” o “picos” en donde se presentan

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

las mayores deformaciones verticales, las cuales se registraron durante el primer año de simulación, siendo la evolución en estos puntos, muy poca durante el resto de la simulación.

La máxima deformación se registró en el cadenamiento 0+192 m la cual fue de -45.89 mm en el último año de análisis. La deformación registrada en el punto de mayor espesor fue de -28.47 mm, mientras que en la parte con el menor espesor del perfil fue de -37.58 mm.

En los perfiles de la Figura 40, se puede observar claramente la evolución de los desplazamientos verticales del cadenamiento 0+228 al 0+290.5, y es en este tramo también donde se presenta la mayor irregularidad de los perfiles, siendo que este tramo tiene un espesor relativamente constante.

En estos perfiles se presenta una mayor irregularidad que en el CASO 1, la cual se traduce en un mayor IRI. En este caso se presentó un IRI en el primer año de 1.116 mm/m el cual se redujo hasta el último año de análisis a 1.049 mm/m, es decir, disminuyó un 6%. Del año 1 al año 2 se presentó la mayor reducción la cual fue de 2.24%, después para los siguientes años fue de 1.43 % (año 2 a 3), 1.34% (año 3 a 4) y 0.99% (año 4 a 5).

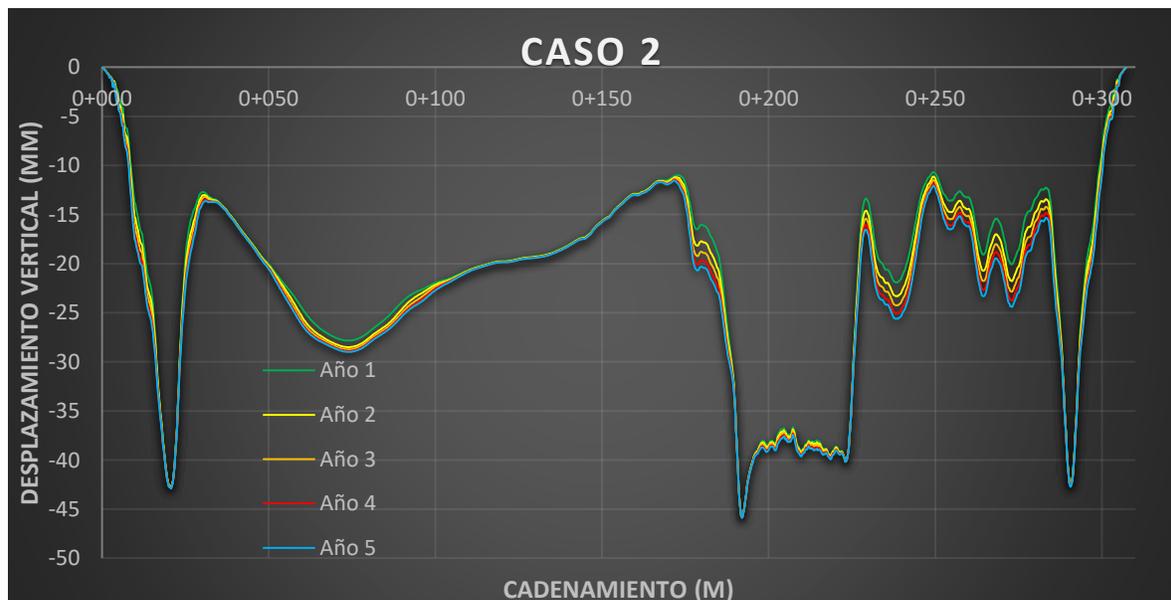


Figura 40 Evolución del perfil para el caso 2, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

### 5.1.3 Caso 3 (Long= 24, Esp=0.05)

En los perfiles obtenidos para los 5 años de simulación para este caso, se observa en la Figura 41, que en el tramo del cadenamiento 0+191.5 al 0+290.5, se presenta una mayor irregularidad en las deformaciones verticales. Es dentro de este tramo donde se puede apreciar de mejor manera la evolución de los desplazamientos a lo largo de los 5 años de simulación.

Al igual que en los casos anteriores, en los puntos donde se generan los mayores desplazamientos verticales, el mayor valor de desplazamiento ocurre en el primer año, siendo que después, se siguen presentando desplazamientos, pero con un valor mucho menor.

El desplazamiento vertical máximo se genera en el cadenamiento 0+191.5, la cual presenta un valor de -49.57 mm. En el espesor máximo del perfil, se genera una deformación vertical de -28.54 mm, mientras que en el espesor mínimo la deformación generada es de -36.88 mm.



Figura 41 Evolución del perfil para el caso 3, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

El IRI obtenido en el primer año corresponde a un IRI de 1.036 mm/m disminuyendo a través del tiempo hasta 0.924 mm/m (reducción del 10.81%). EL IRI se reduce en

un 4.83% del año 1 al año 2, después, se reduce 2.80% del año 2 al año 3, en seguida, se reduce un 1.93% del año 3 al año 4 y, por último, se presenta una reducción del 1.25% del año 4 al año 5.

#### 5.1.4 Caso 4 (Long= 33, Esp=0.05)

En este caso, el desplazamiento vertical máximo se presentó en el cadenamiento 0+191.75, el cual fue de -48.92 mm. En el espesor máximo se registró una deformación de -28.07 mm y en el espesor mínimo una deformación de -29.51 mm.

En la Figura 42 se observan los perfiles obtenidos para los 5 años de estudio. En esta figura, se observa que del cadenamiento 0+223.25 al 0+290.5 se genera el tramo con mayor irregularidad, siendo muy variable los desplazamientos registrados a lo largo del tramo, en los que, además se puede notar cómo evolucionan de un año al otro.

Los puntos donde se generan los desplazamientos verticales con mayor valor que se pueden observar en la Figura 42, registran una evolución de desplazamiento vertical muy pequeña, ya que la mayor deformación en estos puntos ocurre en el primer año de simulación.

Para este caso, el IRI calculado para el primer año fue de 1.14 mm/m, mientras que, para el final del periodo de estudio, se obtuvo un IRI de 1.044 mm/m, dando como resultado una disminución del 8.42%. Del año 1 al año 2, la reducción del IRI fue de un 3.60%; del año 2 al 3, fue de 2.19%; del año 3 al 4 fue de 1.58% y, finalmente del año 4 al año 5 fue de 1.05%.



Figura 42 Evolución del perfil para el caso 4, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

#### 5.1.5 Caso 5 (Long= 41, Esp=0.05)

En los perfiles obtenidos en este caso no se observan variaciones tan bruscas en los desplazamientos verticales a lo largo del perfil, sin embargo, se observan varios puntos en los cuales se presentan las mayores deformaciones. En la Figura 43 se muestran los perfiles obtenidos para el CASO 5.

En este caso, el desplazamiento vertical máximo ocurre en el cadenamiento 0+224, con un valor de -45.50 mm. En este punto, al igual que en los demás puntos donde la deformación tiene un valor alto, la evolución de los desplazamientos en el tiempo es casi imperceptible, ya que al igual que en los casos anteriores, el desplazamiento vertical de mayor valor ocurre en el primer año.

La deformación en el espesor máximo es de -27.92 mm; en este punto se puede apreciar la evolución de los desplazamientos con el paso del tiempo, mientras que, en el punto de espesor mínimo, no es tan notorio la evolución de los desplazamientos. Este punto de espesor mínimo tiene un desplazamiento vertical de -33.27 mm al final de la simulación.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

En estos perfiles, el IRI en el primer año fue de 1.149 mm/m, mientras que en el año 5 fue de 1.095 mm/m, decreciendo un 4.70%. Esto ocurrió reduciéndose del año 1 al 2 2%, del año 2 al 3 1.31%, del año 3 al 4 0.78%, y en del año 4 al año 5 ocurrió un incremento del 0.61%.

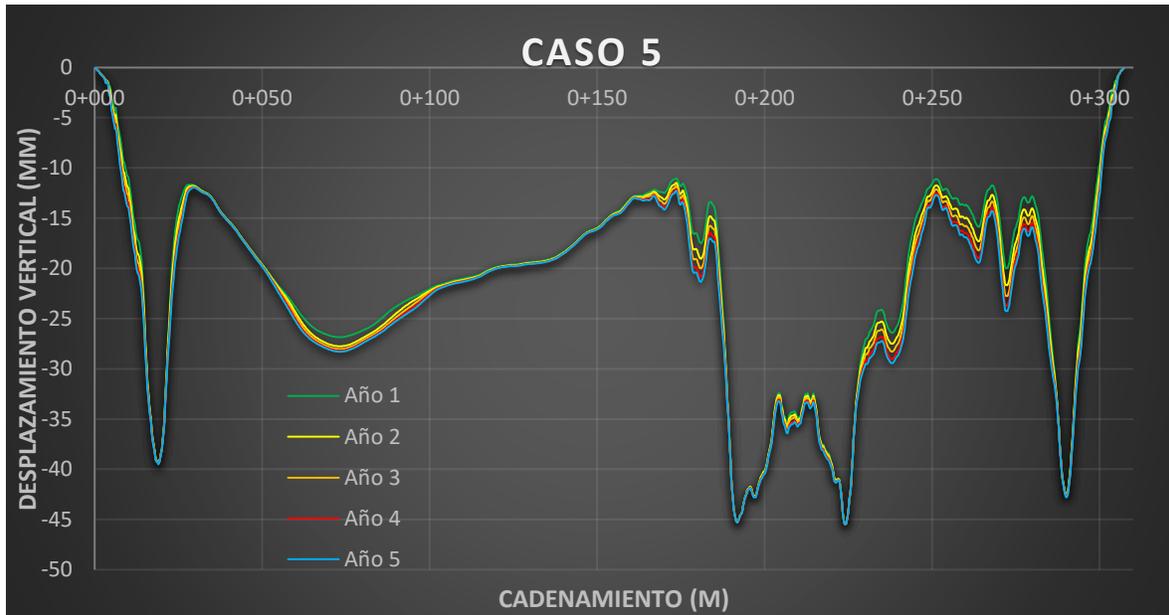


Figura 43 Evolución del perfil para el caso 5, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

### 5.1.6 Caso 6 (Long= 50, Esp=0.05)

En la Figura 44 se observan los perfiles obtenidos para el caso 6. En la figura se pueden observar cómo los perfiles presentan una gran irregularidad del cadenamiento 0+184 al cadenamiento 0+290.5, presentándose el mayor desplazamiento vertical en el cadenamiento 0+184 con un valor de -48.915 mm. En este punto, no es apreciable la evolución de los desplazamientos, al igual que en otros puntos de la Figura 44. Esto es debido a que la mayor deformación ocurrió en el primer año de simulación.

En el espesor máximo se registra una deformación de -27.93 mm y es uno de los tramos, donde se puede apreciar dentro de la Figura 44, el aumento en la deformación en el perfil con el tiempo. Por otro lado, en el espesor mínimo se registra un valor de deformación de -31.16 mm al final de la simulación y en el cual, es un poco notorio dentro de la Figura 44 la evolución en su deformación.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Debido a que este perfil presenta una mayor irregularidad en la continuidad de las deformaciones a lo largo del perfil, se obtuvo un IRI en el primer año de 1.285 mm/m, mientras que, para el final del periodo de estudio, se obtuvo un IRI de 1.158 mm/m, es decir, se redujo en un 9.88%. Del año 1 al año 2, la reducción del IRI fue de un 4.05%; del año 2 al 3, fue de 2.33%; del año 3 al 4 fue de 2.18% y, finalmente del año 4 al año 5 fue de 1.32%.

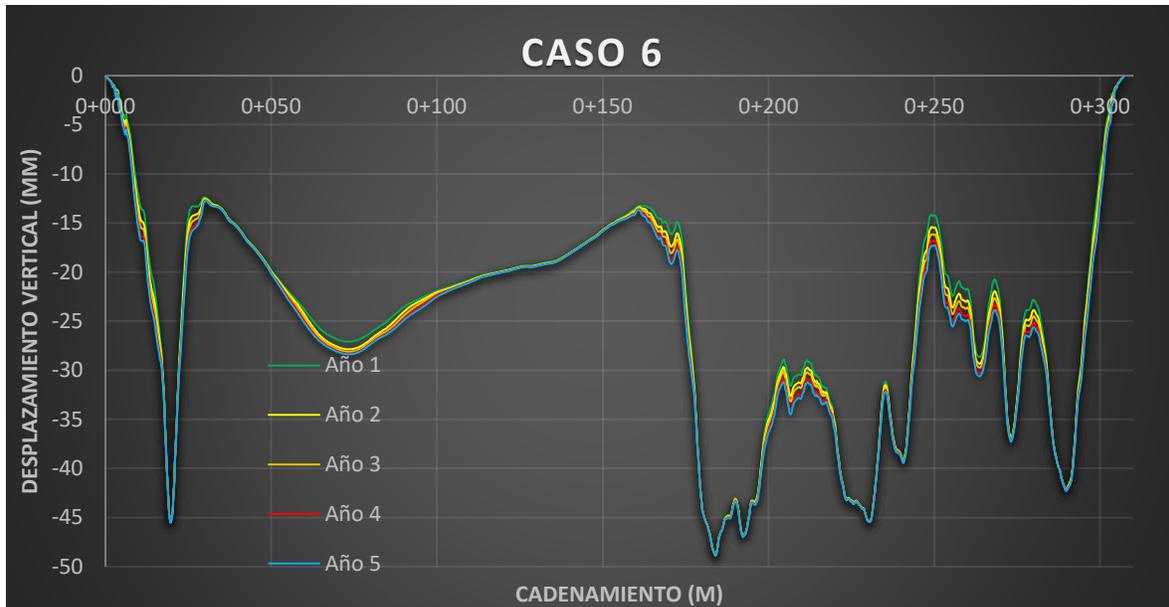


Figura 44 Evolución del perfil para el caso 6, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

### 5.1.7 Caso 7 (Long=50, Esp=0.10)

En el CASO 7 destaca el desplazamiento vertical en el cadenamiento 0+187.5, el cual es el máximo con un valor de -44.61 mm al final de la simulación. En la Figura 45 se aprecian los perfiles obtenidos para los 5 años de simulación, en la cual se observan los diferentes puntos en donde los desplazamientos verticales son los mayores y en los que la evolución de estos es muy poco apreciable.

En los puntos con el espesor máximo y mínimo, se obtuvieron las deformaciones verticales de -28.30 mm y -36.24 mm, respectivamente, notándose de una mejor manera como crecen los desplazamientos a través del tiempo en el punto de mayor espesor.



Figura 45 Evolución del perfil para el caso 7, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

En estos perfiles, las irregularidades generadas no tienden a ser tan variadas a lo largo del perfil. Esto se representa en el IRI calculado para cada perfil, siendo el valor de IRI en el Primer año de 0.885 mm/m, mientras que, para el año 5, se obtuvo un IRI de 0.833 mm/m, dando como resultado una reducción del 5.88%. En este caso, la reducción del año 1 al año 2, fue de un 2.82%; del año 2 al 3, fue de 1.47%; del año 3 al 4 fue de 0.90% y, finalmente del año 4 al año 5 fue de 0.68%.

#### 5.1.8 Caso 8 (Long= 50, Esp=0.15)

En la Figura 46, se pueden observar los perfiles obtenidos para el CASO 8. En los perfiles obtenidos de este caso, destaca el tramo comprendido del cadenamiento 0+223.25 al 0+290.5, ya que las deformaciones generadas no son tan grandes en comparación con los casos anteriores.

En este CASO, el desplazamiento vertical máximo se presentó en el cadenamiento 0+188, con un valor de -46.49 mm al final de la simulación. En el tramo con mayor espesor se registró una deformación vertical de -28.36 mm, mientras que en el de menor espesor se obtuvo una deformación de -36.13 mm al final de la simulación.



Figura 46 Evolución del perfil para el caso 8, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

El IRI calculado para el primer año fue de 0.953 mm/m, mientras que, para el final del periodo de estudio, se obtuvo un IRI de 0.916 mm/m, dando como resultado una disminución del 3.88%; del año 1 al año 2, la reducción del IRI fue de un 1.78%; del año 2 al 3, fue de 0.84%; del año 3 al 4 fue de 0.84% y, finalmente del año 4 al año 5 fue de 0.42%.

#### 5.1.9 Caso 9 (Long= 50, Esp=0.20)

En la Figura 47 se presentan los perfiles resultantes para esta simulación, donde se observa que las mayores irregularidades ocurren del cadenamiento 0+225 al cadenamiento 0+290.5, siendo notorio el tramo de 0+250 al 0+280 en el cual se aprecia claramente la evolución de los desplazamientos a lo largo del tiempo.

El desplazamiento vertical máximo tiene un valor de -48.09 mm y ocurre en el cadenamiento 0+187.5 mm al final de la simulación. Por otro lado, en el punto de mayor espesor se registró una deformación de -28.16 mm, mientras que en el punto de menor espesor se tiene un valor de deformación de -35.89 mm al final de la simulación.



Figura 47 Evolución del perfil para el caso 9, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

El IRI obtenido para este caso de estudio fue de los menores para el primer año, siendo de 0.803 mm/m. Este IRI se redujo un 5.11% para el año 2; en el año 3 la reducción fue de 3.36%, para el año 4 fue de 2.74% y para el año 5 de 1.49%, reduciéndose un total de 12.70 %, que resulto en un IRI de 0.701 mm/m para el año 5.

#### 5.1.10 Caso 10 (Long= 50, Esp=0.25)

La simulación realizada para este caso da como resultado los perfiles mostrados en la Figura 48, en la cual, se observa que el desplazamiento vertical máximo ocurre en el cadenamiento 0+020 con una deformación vertical de -46.20 mm al final de la simulación. Las deformaciones obtenidas en los puntos con mayor y menor espesor fueron de -28.42 mm y -28.16 mm respectivamente.

En la Figura 48 también se identifican varios tramos donde es evidente le evolución de las deformaciones verticales en el perfil del camino.

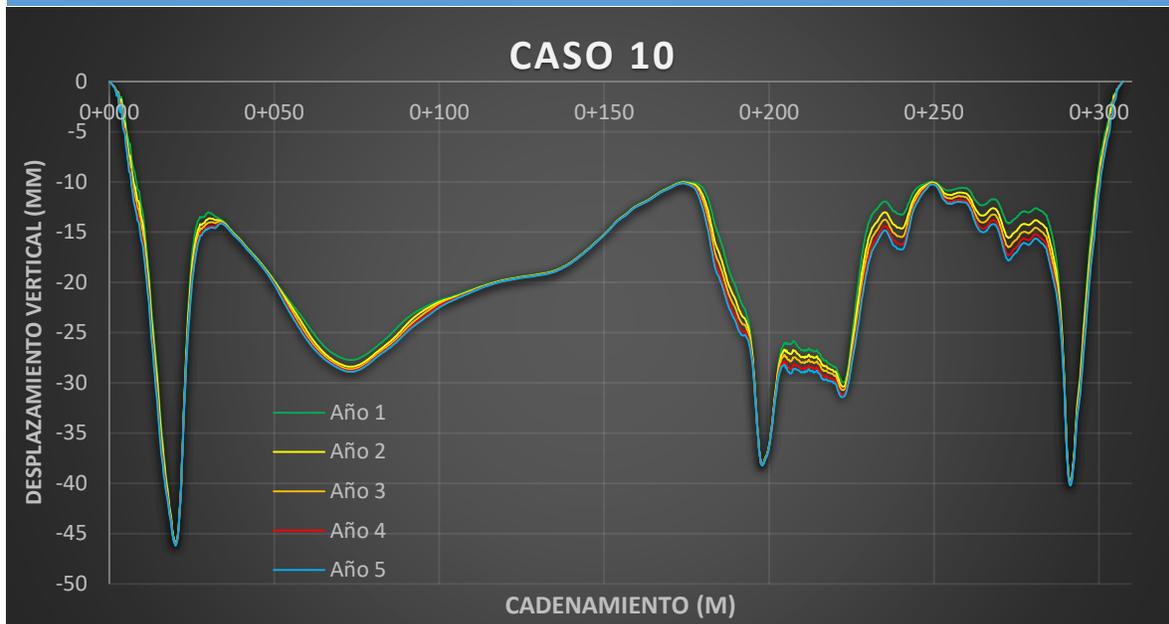


Figura 48 Evolución del perfil para el caso 10, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

Al generarse perfiles sin muchas variaciones en sus deformaciones verticales a lo largo del perfil, se obtuvo un IRI bajo para el primer año, siendo este de 0.812 mm/m. Al pasar del año 1 al año 2, el IRI disminuyó en un 2.87%; del año 2 al 3 en un 1.56%, del año 3 al 4 en un 1.44% y, finalmente del año 4 al año 5 en un 0.96%, resultando en una reducción total de 6.82% (IRI de 0.779 mm/m para el año 5).

#### 5.1.11 Caso 11 (Long= 50, Esp=0.30)

En la Figura 49 se presenta la evolución del perfil en el tiempo para el CASO 11. En este caso, la deformación registrada para el punto donde se tiene mayor y menor espesor fue de -28.03 mm y -29.03 mm respectivamente, mientras que el desplazamiento vertical máximo es -43.72 mm en el cadenamiento 0+192.25.

Los perfiles obtenidos en este caso presentan una variación más homogénea en la continuidad de las deformaciones, sin embargo, se generan 4 picos en donde la deformación vertical es mayor, como se puede observar en la Figura 49.

Debido a lo anterior, el IRI calculado para el primer año fue el menor de todos los casos, siendo de 0.764 mm/m. El IRI tiene una reducción total del 6.54%, lo que lo deja en un valor de 0.714 mm/m. Del año 1 al 2, la disminución fue de un 2.75%;

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

del año 2 al 3, fue de 1.70%; del año 3 al 4 fue de 1.18% y, finalmente del año 4 al año 5 fue de 0.92%.

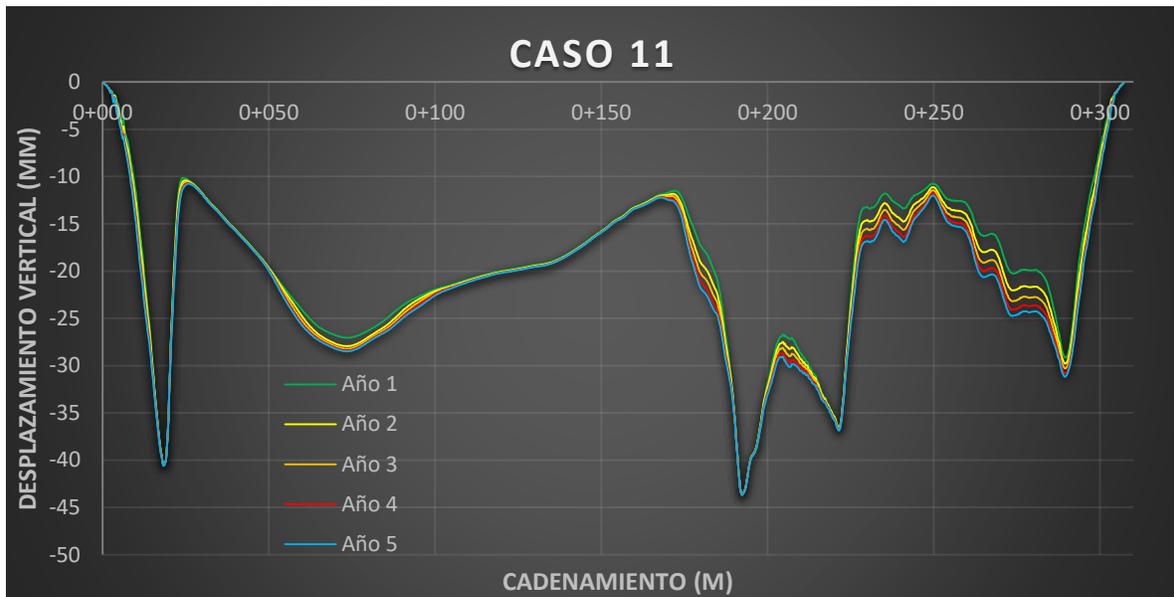


Figura 49 Evolución del perfil para el caso 11, con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

### 5.1.12 Evolución del IRI

Al realizar los cálculos de IRI correspondientes para cada caso de estudio, se observó que el IRI tiende a disminuir al pasar el tiempo para todos los casos, siendo el caso 9 el que presenta la mayor reducción, la cual fue de 12.70% al final del periodo de simulación (año 5), respecto a su IRI inicial (año 1).

En la Tabla 19 se muestran los IRI calculados para cada caso y para cada año con la VARIANTE 1. En esta tabla podemos observar que el caso 6 es el que presenta un mayor IRI y, se mantiene como el mayor a lo largo del tiempo. Por otro lado, el menor IRI Para los tres primeros años se presenta en el caso 11 y, para los años 4 y 5 se registran los menores IRI en el caso 9.

Se observa también, que los casos en los que se mantienen un espesor (Longitud Y) constante de 0.05 m y se modifica la Longitud X, se obtienen los IRI más altos. Por el contrario, al mantener la Longitud X constante a 50 m y variar el espesor (Longitud Y), los IRI son menores, notándose que, para el primer año, la tendencia

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

del IRI es de reducirse al aumentar el espesor; no así para los demás años, ya que para cada caso la reducción en el tiempo varía.

Tabla 19 Resumen de los IRI obtenidos para las simulaciones con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa.

Variante 1 ( $\sigma=0.35$ )							
CASO	Longitud X (m)	Longitud Y (m)	IRI (mm/m)				
			Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
1	Sin porosidad aleatoria		0.87	0.847	0.83	0.812	0.803
2	16	0.05	1.116	1.091	1.075	1.06	1.049
3	24	0.05	1.036	0.986	0.957	0.937	0.924
4	33	0.05	1.140	1.099	1.074	1.056	1.044
5	41	0.05	1.149	1.126	1.111	1.102	1.095
6	50	0.05	<b>1.285</b>	<b>1.233</b>	<b>1.203</b>	<b>1.175</b>	<b>1.158</b>
7	50	0.10	0.885	0.86	0.847	0.839	0.833
8	50	0.15	0.953	0.936	0.928	0.92	0.916
9	50	0.20	0.803	0.762	0.735	<b>0.713</b>	<b>0.701</b>
10	50	0.25	0.836	0.812	0.799	0.787	0.779
11	50	0.30	<b>0.764</b>	<b>0.743</b>	<b>0.73</b>	0.721	0.714

### 5.1.13 Comparativa de los perfiles en el año 5

En la Figura 50 se presentan los perfiles al final de la simulación para todos los casos de estudio. En esta figura podemos observar que los perfiles tienden a la misma configuración en los desplazamientos verticales del cadenamiento inicial hasta el cadenamiento 0+161.25 (aproximadamente).

Del cadenamiento inicial al cadenamiento 0+020 el espesor inicial aumenta de 0 hasta 1.5 m. En este tramo se presenta un pico, con una de las deformaciones verticales más grandes, para todos los casos de estudio. El valor de la deformación en este punto varía según el caso que se analice, siendo el mayor valor el de -46.20 mm en el caso 10.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

El siguiente tramo que se puede distinguir es el del cadenamiento 0+020 al cadenamiento 0+161.25 (aproximadamente). Podemos observar en la Figura 50, que las deformaciones presentadas en este tramo tienden a ser uniformes, siendo las mayores las cercanas al cadenamiento 0+068.75, el cual tiene el máximo espesor del perfil longitudinal el cual es 4.85 m. Después del cadenamiento 0+161.25 (aproximadamente), los perfiles presentan diferentes configuraciones en sus deformaciones verticales.

En el cadenamiento 0+161.25 se tiene un espesor inicial de 2.45 m, disminuye hasta alcanzar el espesor mínimo de 1.24 m en el cadenamiento 0+204.5; después, el espesor aumenta hasta 1.93 m en el cadenamiento 0+252.25, y termina con un espesor inicial de 1.49 m en el cadenamiento 0+290. En este tramo se generan las mayores irregularidades para todos los casos, donde se pueden distinguir 3 puntos donde los desplazamientos son mayores, los cuales se encuentran en los cadenamientos 0+190, 0+223 y 0+290 (Aproximadamente) y cuentan con un espesor inicial de 1.50 m aproximadamente.

Del cadenamiento 0+223 al 0+290, los perfiles obtenidos para cada caso de estudio presentan una mayor aleatoriedad en sus deformaciones verticales. Este tramo se mantiene relativamente constante en el espesor inicial, sin embargo, como se observa en la Figura 50, es donde los perfiles varían drásticamente de caso a caso.

En el cadenamiento 0+290 se puede observar que, para todos los casos, se genera uno de los picos con mayor deformación vertical. A partir de este cadenamiento y hasta el cadenamiento final, el espesor disminuye de manera lineal al igual que las deformaciones.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

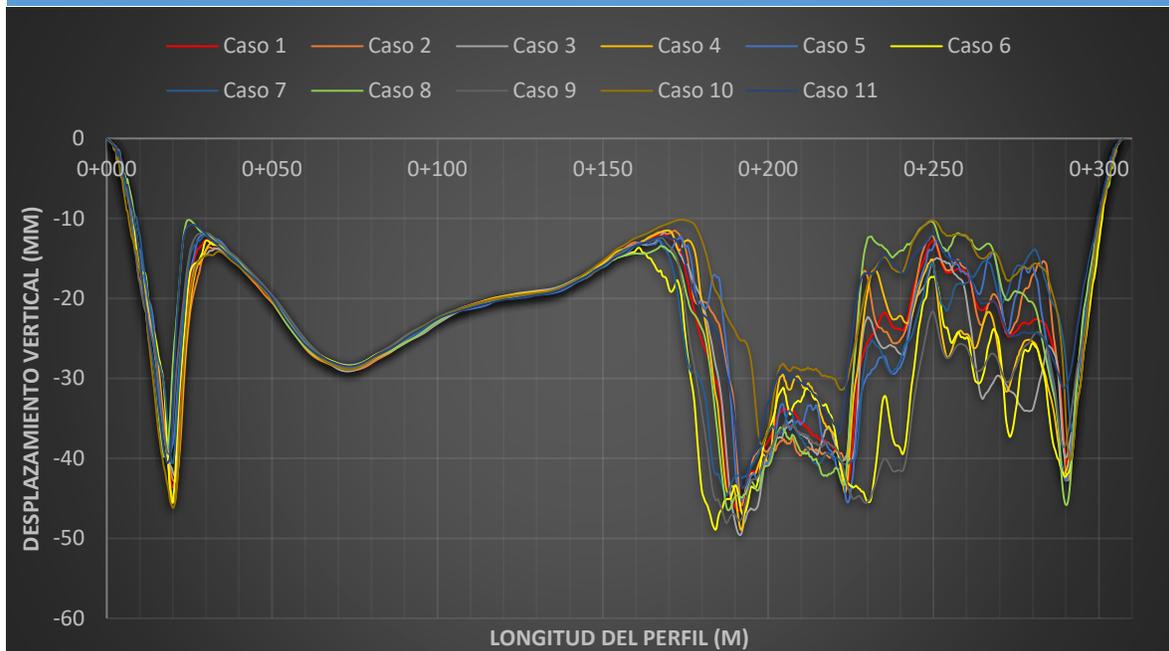


Figura 50 Perfiles obtenidos al final del tiempo de la simulación (Esfuerzo aplicado de 0.35 MPa).

El desplazamiento vertical máximo registrado para la variante 1 fue de -49.57 mm, el cual se registró en el caso 3, en el cadenamiento 0+191.5.

Para estos casos de estudio, se observó que los máximos desplazamientos ocurren en donde el perfil tiene un espesor inicial igual o cercano a 1.5 m, los cuales, se presentan en los cadenamientos que están cerca de la entrada y salida del perfil del camino, y antes y después de la zona con menor espesor. La generación de estos puntos de deformación máxima es debida a la geometría del terraplén y del esfuerzo aplicado.

En la Figura 51 y la Figura 52, se muestra la dirección de los vectores de desplazamiento al final de la simulación, para los puntos de entrada y salida del terraplén, del caso 6. En estas figuras se observa que existe un desplazamiento horizontal hacia estos puntos, lo que ocasiona que el vector resultante de desplazamiento no sea totalmente vertical.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

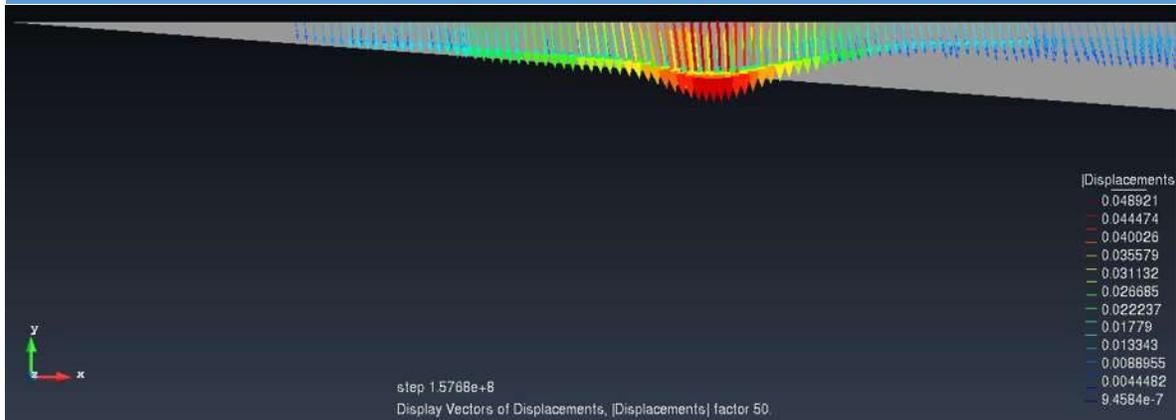


Figura 51 Vectores de desplazamiento al final de la simulación, Cadenamiento 0+000 al 0+033, CASO 6, variante 1.

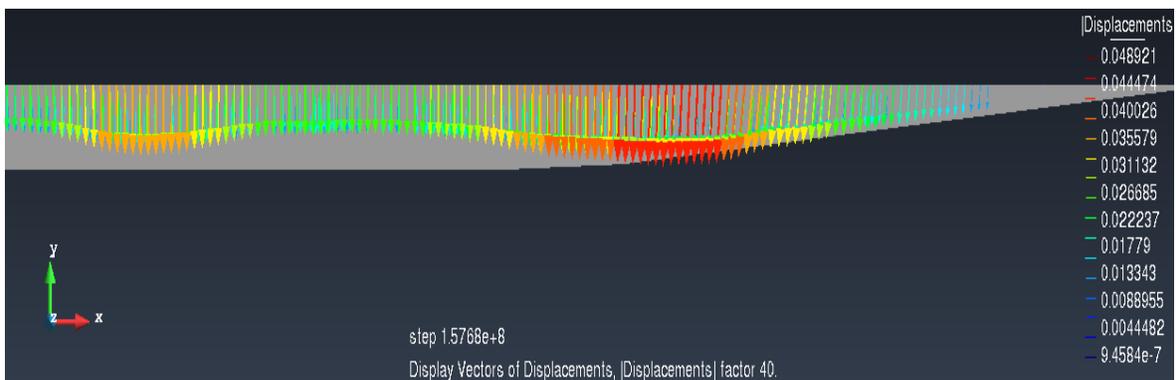


Figura 52 Vectores de desplazamiento al final de la simulación, Cadenamiento 0+270 al 0+307, CASO 6, variante 1.

En la mayoría de los casos estudiados, el desplazamiento vertical final en el espesor mínimo fue mayor que el desplazamiento en el cadenamiento de mayor espesor, siendo el caso 10, el único donde el desplazamiento fue mayor en el cadenamiento de mayor espesor.

En la Tabla 20 se presentan los valores de los desplazamientos finales en diferentes puntos para cada caso de estudio.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Tabla 20 Deformaciones obtenidas para la VARIANTE 1.

Casos	Desplazamiento máx.		Mayor espesor (4.85m, 0+068.75)	Menor espesor (1.24 m, 0+204.5)
	Cadenamiento	valor (mm)	valor (mm)	valor (mm)
1	0+191.00	46.55	28.08	33.81
2	0+192.00	45.89	28.47	37.58
3	0+191.50	49.57	28.54	36.88
4	0+191.75	48.92	28.07	29.51
5	0+224.00	45.50	27.92	33.27
6	0+184.00	48.92	27.93	31.16
7	0+187.50	44.61	28.30	36.24
8	0+188.00	46.49	28.36	36.13
9	0+187.50	48.09	28.16	35.89
10	0+020.00	46.20	28.42	28.16
11	0+192.25	43.72	28.03	29.03

### 5.1.14 Agrupamiento de casos para la variante 1

En la Figura 53 se agruparon los casos de estudio en los cuales la Longitud Y (Espesor) se mantiene constante (0.05 m) y la Longitud X varía para cada caso. Dentro de esta figura también se encuentra el caso 1, el cual sirve de referencia. En la etiqueta de la leyenda, se incluyó el IRI alcanzado para cada caso al final del periodo de simulación.

Los perfiles mostrados presentan una gran variabilidad en su configuración en comparación con el caso 1 a partir del cadenamiento 0+161.25 hasta el cadenamiento 0+290.5. Para todos los casos presentados en este grupo, las deformaciones máximas ocurrieron entre estos cadenamientos.

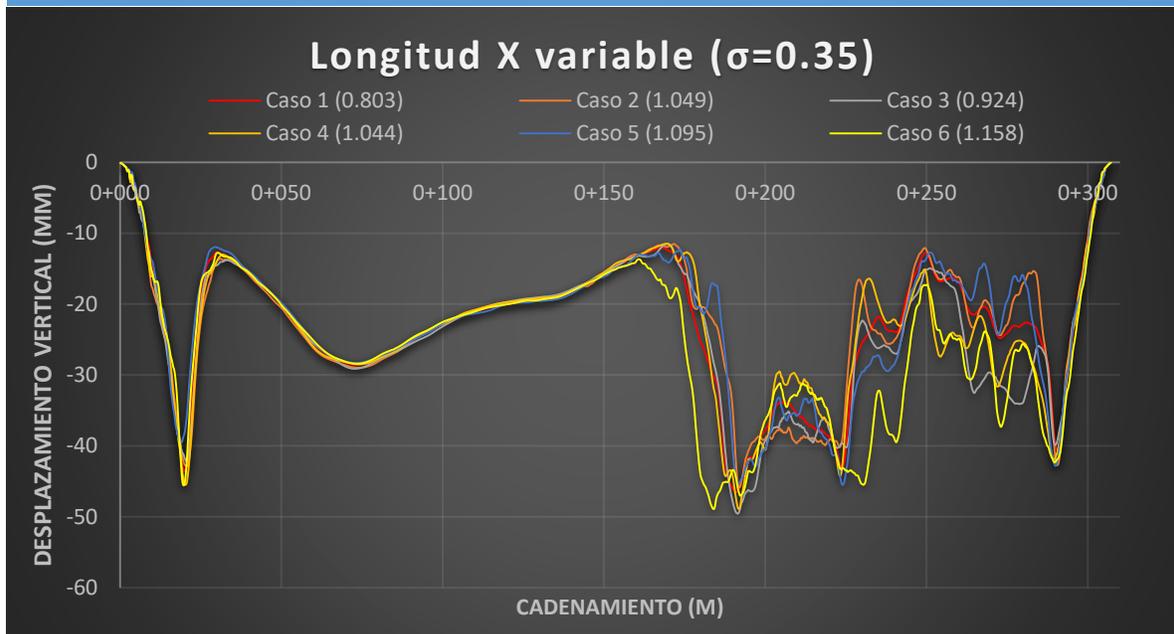


Figura 53 Perfiles de deformación con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa a distintas Longitudes en X y un espesor de 0.05 m.

En la Figura 54 se agruparon los casos en los cuales la Longitud X se mantiene constante (50 m) y la Longitud Y (Espesor) varía para cada caso, incluyendo el caso 1. Se incluye el IRI dentro de la etiqueta de la leyenda. En la Figura podemos observar que los perfiles para estos casos presentan una configuración similar a la del caso 1, pero con diferentes valores de deformación.

Entre estos perfiles destaca el caso 6, en el cual, la irregularidad es más notoria, lo que conlleva a un mayor IRI.

Al agrupar los casos como se mencionó anteriormente, se puede notar que la variabilidad en la Longitud X representa una mayor importancia, pues en estos casos, se generan perfiles más irregulares y con mayor variabilidad en sus deformaciones lo que conlleva a valores de IRI mayores.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

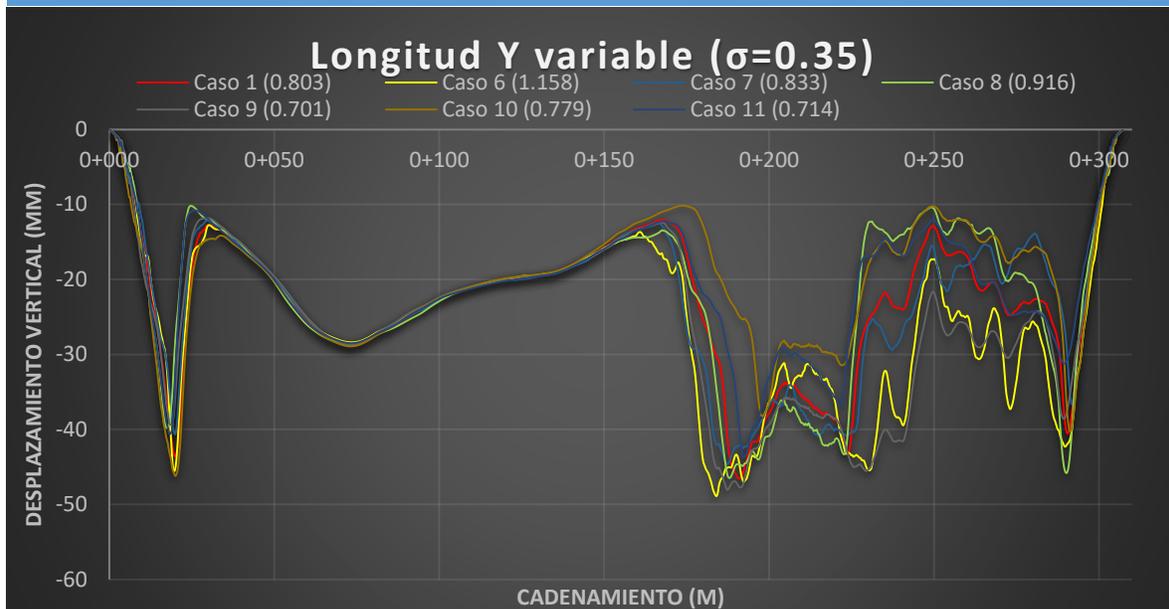


Figura 54 Perfiles de deformación con esfuerzo aplicado de 0.35 MPa a distintas Longitudes en Y y una Longitud en X de 50 m.

### 5.1.15 Análisis de la infiltración para el CASO 6 (El más crítico)

Para comprender de una mejor manera las deformaciones volumétricas dentro del terraplén, se analizará la infiltración en el terraplén, en los cadenamientos 0+068.75 (mayor espesor = 4.85m), 0+204.5 (menor espesor = 1.24m) y 0+250 (espesor = 1.92), del caso 6, ya que este caso fue en el que se registró las mayores irregularidades en el perfil (mayor IRI). Esto se realiza con el fin de observar el comportamiento del terraplén en función del grado de saturación y presión del líquido durante de la simulación.

#### 5.1.15.1 Grado de saturación

En la Figura 55 se presenta la evolución del grado de saturación ( $S_r$ ) a lo largo de la simulación, contra la precipitación impuesta en el modelo. En esta figura se observa la evolución de 3 puntos, estos están ubicados sobre la superficie, en los cadenamientos 0+068.75 con un espesor de 4.85 m (mayor espesor en el perfil), 0+204.5 con un espesor de 1.24 m (menor espesor) y en el cadenamiento 0+250 (espesor de 1.92 m), donde se pudo observar con mayor claridad la evolución de las deformaciones verticales, en los perfiles de deformación.

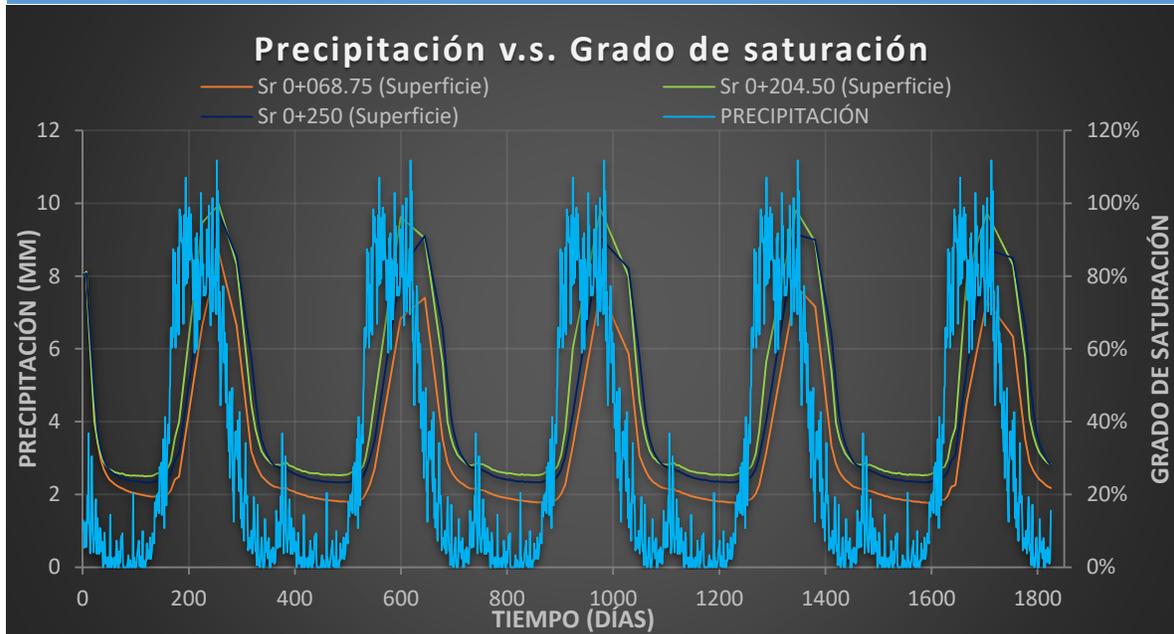


Figura 55 Precipitación utilizada para la simulación vs la evolución del grado de saturación en la superficie en diferentes cadenamientos para el CASO 6 (VARIANTE 1).

De acuerdo con las condiciones iniciales impuestas en el modelo, el  $Sr$  inicial para toda la sección es igual. Al empezar a transcurrir el tiempo, se observa que el  $Sr$  empieza a disminuir, hasta alcanzar su valor más bajo transcurrido aproximadamente 160 días; dentro de este periodo de tiempo, se considera que comienza el periodo de lluvias, por lo que existe un desfase de aproximadamente 30 días para que la lluvia comience a infiltrarse en el terraplén.

Después, eleva su valor hasta alcanzar su máxima saturación aproximadamente 100 días después. Una vez alcanzada su saturación máxima, tiende a disminuir siguiendo la forma de la precipitación, pero con un desfase de tiempo de aproximadamente de 45 días, es decir, la cantidad de precipitación comienza a ser mucho menor, sin embargo, el terreno aún mantiene su saturación por ese periodo de desfase. Este proceso se repite para los 4 años restantes de la simulación.

Los valores tan bajos a que llega el grado de saturación, corresponde a la consideración de todas las variables climáticas aplicadas y no solo de la precipitación, pues como se observó en los resultados de la investigación de Belloso (2012), donde solo se implementó la lluvia como condición de frontera, el grado de

saturación en la superficie, aumentaba durante el periodo de lluvias y disminuía cuando terminaban, pero siempre quedando con un valor más alto, que el grado de saturación antes de dicho periodo. Pero en este caso, al considerar más variables climáticas (radiación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa, nubosidad y presión atmosférica) en la interface suelo-atmosfera, modifican significativamente las condiciones de saturación en la superficie del suelo.

El máximo y el mínimo grado de saturación a los que llegan los 3 puntos analizados, dependen de la profundidad, pues como se puede observar en la Figura 55, en el punto de menor espesor, es en el que se alcanza un mayor  $S_r$  con un valor de 99.6%, mientras que, en el punto de mayor espesor, se obtuvo un máximo  $S_r$  de 86.4%. Por otro lado, en el cadenamiento 0+250 (espesor 1.92 m), se obtuvo un  $S_r$  máximo de 97.2%; estos valores corresponden al final del primer periodo de lluvias.

Para analizar las condiciones de saturación por debajo de la superficie en los diferentes periodos de lluvia, se presentan las Figura 56, Figura 58, Figura 60.

En la Figura 56 se presentan los perfiles del  $S_r$  para los diferentes periodos de lluvia en el cadenamiento 0+068.75. En esta figura, se muestra el grado de saturación inicial en todo el perfil. Se observa que, al comienzo de la simulación, el perfil tiene un  $S_r$  similar en toda su profundidad, aumentando conforme se acerca al terreno natural. Este aumento es debido a la condición de nivel freático que se impuso en la modelación, y se presenta en toda la simulación, es decir, la zona activa en este cadenamiento es hasta la profundidad de 2.5 m aproximadamente y lo podemos observar en la Figura 57, donde se presenta la evolución del  $S_r$  a diferentes profundidades.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

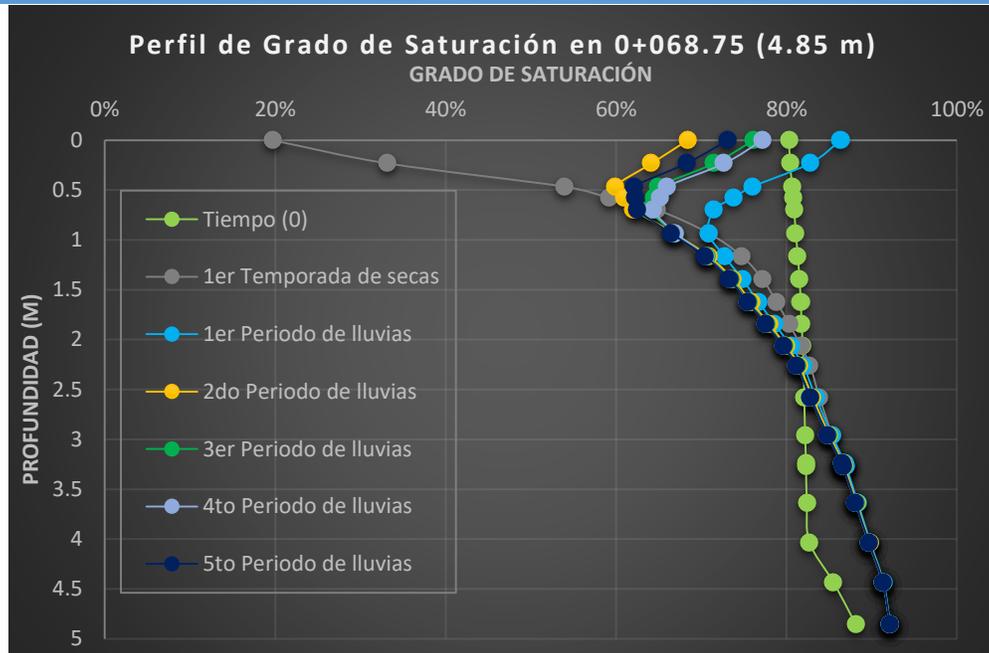


Figura 56 Perfil del grado de saturación ( $S_r$ ) para el cadenamiento 0+068.75 (Espesor 4.85 m) del CASO 6 (Variante 1).

En la primera temporada de secas, la cual ocurre en los primeros 130 días de simulación (aprox.), se observa que el perfil presenta un grado de saturación por debajo del 20% en la superficie. Al ir profundizando en la estructura, el  $S_r$  va aumentando su valor hasta la base. Este aumento se da en gran medida en el primer metro de profundidad.

El perfil del primer periodo de llluvias se obtuvo en el día 256 de la simulación, día en el cual el  $S_r$  es mayor en la superficie y, la precipitación empieza a disminuir en cantidad. En este caso, el  $S_r$  alcanzado en la superficie fue de 86.4%. Al ir profundizando en la capa, el valor disminuye hasta un 66.4% a 0.93 m de profundidad. Después el valor aumenta hasta la zona de equilibrio de saturación, a la profundidad de 2.5 m.

Para hacer un análisis comparativo, se obtuvieron los perfiles de saturación más cercanos al año, tomando como perfil de referencia el primer periodo de llluvias. El perfil del segundo periodo de llluvias se obtuvo 22 días antes de cumplir el año, por lo que se puede observar en la Figura 56, que se obtuvo el registro del  $S_r$  más bajo

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

(68%, sobre la superficie). Esto debido a que aún faltaban días donde la precipitación tenía valores altos.

El perfil del tercer periodo se obtuvo 10 días antes de cumplir los 2 años después del perfil de referencia. En este perfil el  $S_r$  es mayor (76%) que el año anterior, ya que, para este tiempo se alcanzó a contemplar más días de lluvia. En el cuarto periodo de lluvias, el perfil se obtuvo 7 días antes de cumplir los 3 años después del perfil de referencia. En este perfil, el  $S_r$  en la superficie fue de 77%, siendo un poco mayor que el anterior perfil. Para el quinto periodo de lluvias, el perfil obtenido es 12 días antes de cumplir los 4 años después del perfil de referencia. El  $S_r$  en la superficie es de 73%, siendo menor que el  $S_r$  del año anterior.

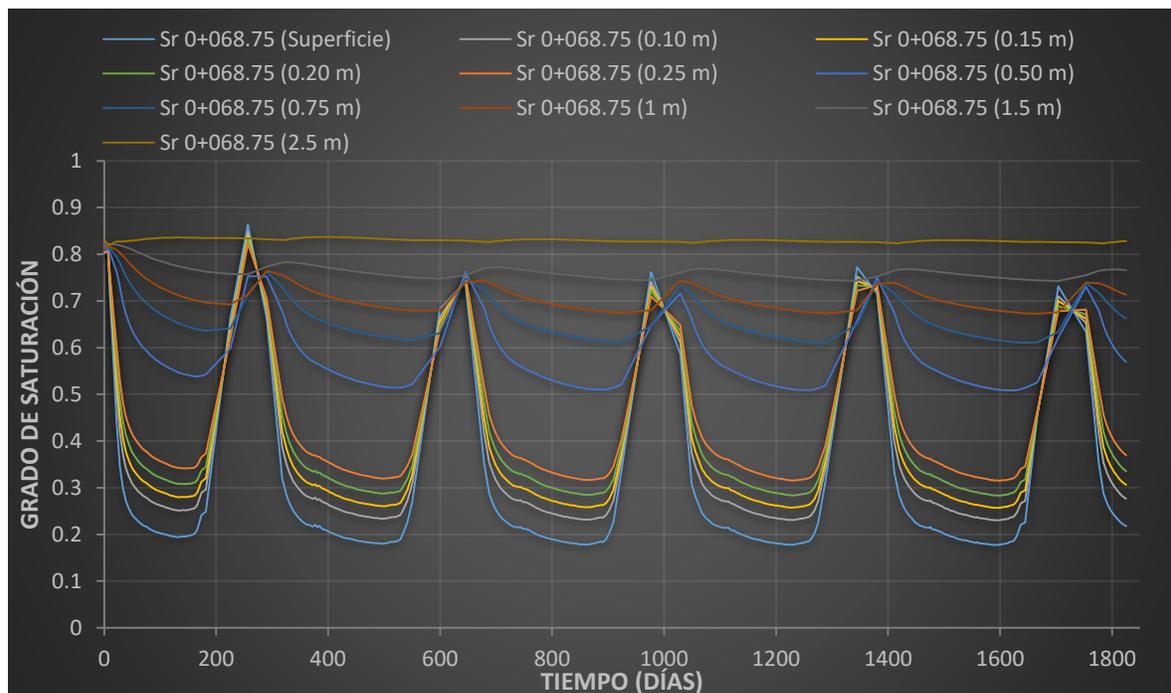


Figura 57 Evolución del grado de saturación para diferentes profundidades en el cadenamiento 0+068.75 (Espesor de 4.85 m) para el CASO 6 (VARIANTE 1).

El análisis en el cadenamiento 0+204.5 (Figura 58) y 0+250 (Figura 60), es similar que, en el cadenamiento anterior, pues los perfiles se obtuvieron en el mismo intervalo de tiempo.

En el caso del cadenamiento de menor espesor (0+204.5), sobresale que el  $S_r$  en todo el espesor alcanza valores muy cercanos a la saturación. Dada la profundidad

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

de 1.24 m en este cadenamiento, y la cercanía con el nivel freático, el  $S_r$  se encuentra por arriba del 93% en todo el espesor, en los 5 periodos de lluvia.

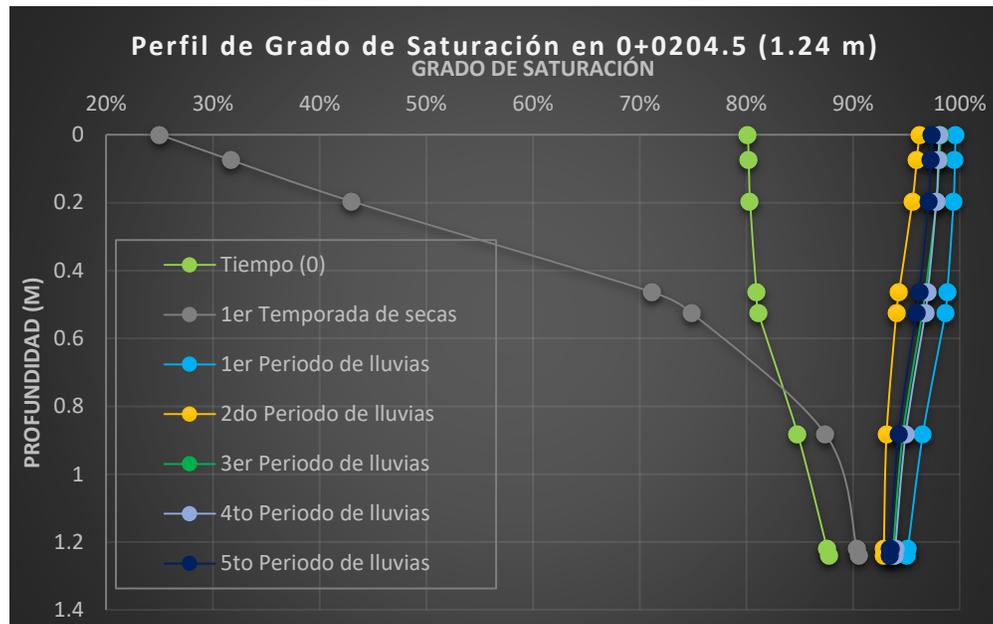


Figura 58 Perfil del grado de saturación ( $S_r$ ) para el cadenamiento con menor espesor (0+204.5) del CASO 6 (VARIANTE 1).

En la Figura 59 Evolución del grado de saturación para diferentes profundidades en el cadenamiento 0+204.5 (Espesor de 1.24 m) para el CASO 6 (variante 1). Se muestran la evolución del grado de saturación a diferentes profundidades del cadenamiento 0+204.5. En esta figura se puede observar que a una profundidad cercana a la base del terraplén se presentan variaciones siguiendo la tendencia de las lluvias, al contrario del cadenamiento 0+068.75, en el cual, el  $S_r$  se mantiene constante en la base a lo largo de la simulación.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

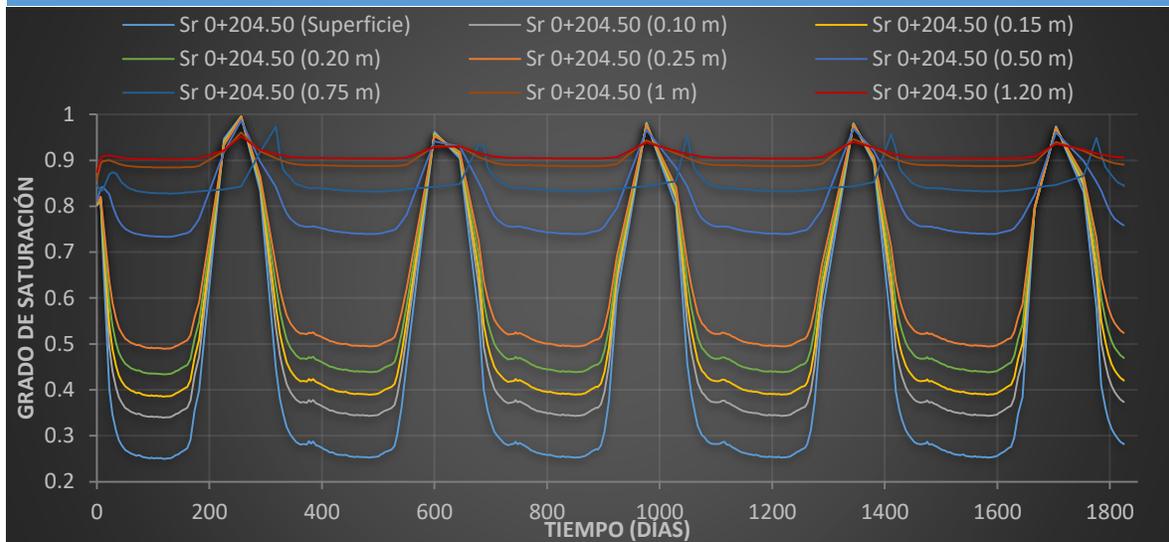


Figura 59 Evolución del grado de saturación para diferentes profundidades en el cadenamiento 0+204.5 (Espesor de 1.24 m) para el CASO 6 (variante 1).

Por otro lado, en el cadenamiento 0+250, el cual tienen un espesor de 1.92 m, los  $S_r$  en la superficie oscilan del 81.9% al 97.2% para los periodos de lluvia. Al tener un mayor espesor que el cadenamiento 0+204.5, el  $S_r$  en los perfiles disminuye, pues el agua infiltrada tiene que recorrer una mayor trayectoria. En la base se mantiene un  $S_r$  similar en todos los periodos pues la condición del nivel freático es la que predomina.

La diferencia que se obtuvo en los  $S_r$  a partir del segundo periodo de lluvias es debida en gran parte, al desfase en el tiempo que se obtuvieron, pues considerando que los datos de la precipitación son los mismos para los 5 años y que los perfiles se obtuvieron en el tiempo donde la precipitación tiene los valores más altos. Es de gran importancia considerar el día de la obtención, pues al alejarse más días del perfil de referencia, no se consideran lluvias importantes. Otra cuestión importante para tomar en cuenta en la reducción del  $S_r$  en los perfiles después del primer periodo de lluvia, son las deformaciones volumétricas ocurridas dentro del terraplén.

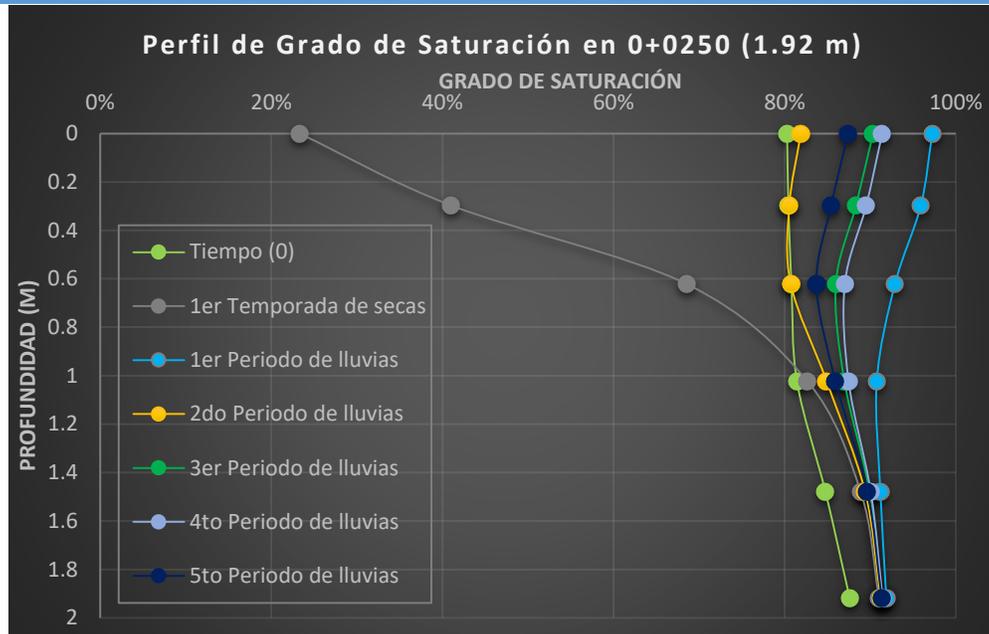


Figura 60 Perfil del grado de saturación ( $S_r$ ) para el cadenamiento 0+250 del CASO 6 (VARIANTE 1).

En la Figura 61 se observa la evolución del  $S_r$  contra la evolución de los desplazamientos verticales en los 3 puntos analizados. En el cadenamiento 0+068.75, se observa que el mayor desplazamiento ocurre al comienzo de la simulación. Después en el primer periodo de llluvias, se observa un pequeño aumento en el colapso. Al pasar los siguientes periodos de lluvia, los colapsos producidos son muy pequeños por lo que no son perceptibles.

Por otro lado, en el cadenamiento 0+204.5 se aprecia claramente como ocurre el mayor desplazamiento en la primera temporada de llluvias. Una vez terminado el primer periodo de llluvias, el colapso no aumenta hasta llegar al siguiente periodo de llluvias, siendo este mucho menor. Este proceso se repite para los siguientes periodos de lluvia, reduciendo el valor del nuevo colapso en cada periodo de llluvias.

En el cadenamiento 0+250 se aprecian claramente cómo se presentan los colapsos en cada periodo de llluvias, siguiendo con el mismo proceso ocurrido en los puntos anteriores descritos.

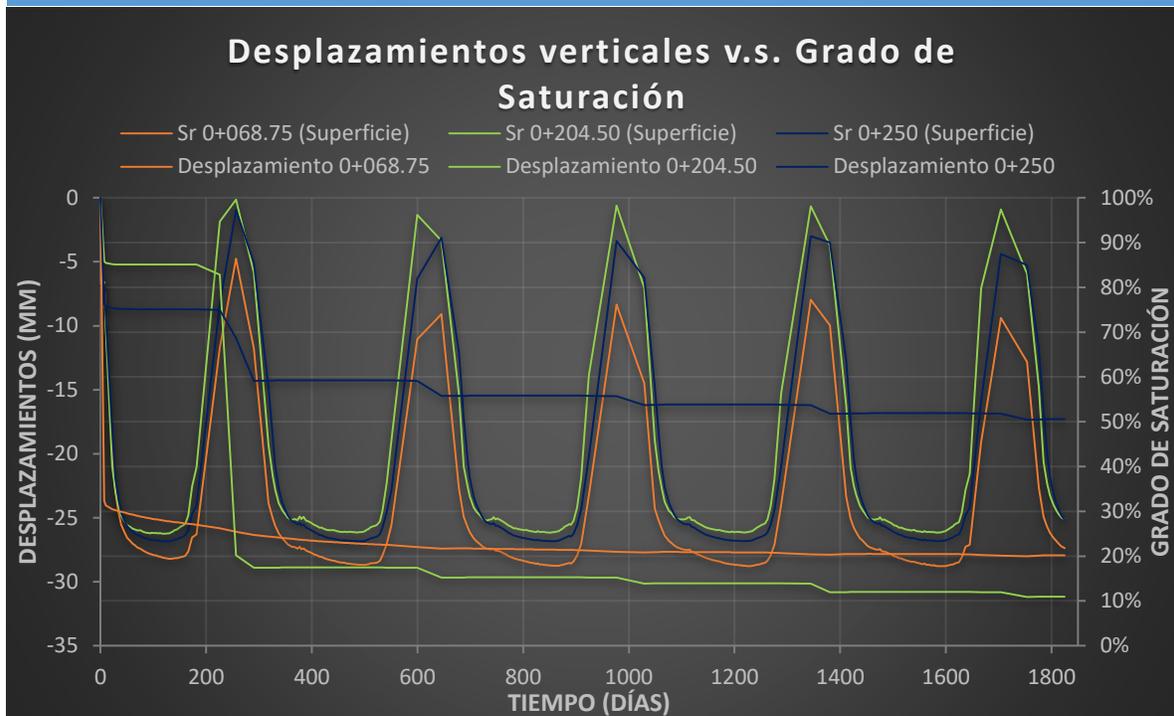


Figura 61 Evolución de los desplazamientos verticales vs la evolución del grado de saturación en la superficie en diferentes cadenamientos para el CASO 6 (Variante 1).

#### 5.1.15.2 Evolución de la presión del Líquido

En la Figura 62 se presentan los resultados de la evolución de la presión del líquido en la superficie contra los desplazamientos para los 3 cadenamientos analizados. La evolución de la presión del líquido ( $PI$ ) en estos 3 puntos se presenta de la misma forma que se presentan las lluvias. Al comenzar la simulación se tiene un periodo de secas, lo cual lleva a presiones muy bajas, ya que al considerar más variables climáticas y no solo la precipitación como comúnmente se hace, las  $PI$  en la superficie y a pocas profundidades se ven afectadas aumentando el valor de la succión.

El colapso ocurrido en cada periodo de lluvias se presenta cuando la  $PI$  alcanza valores muy cercanos a 0, es decir a la saturación.

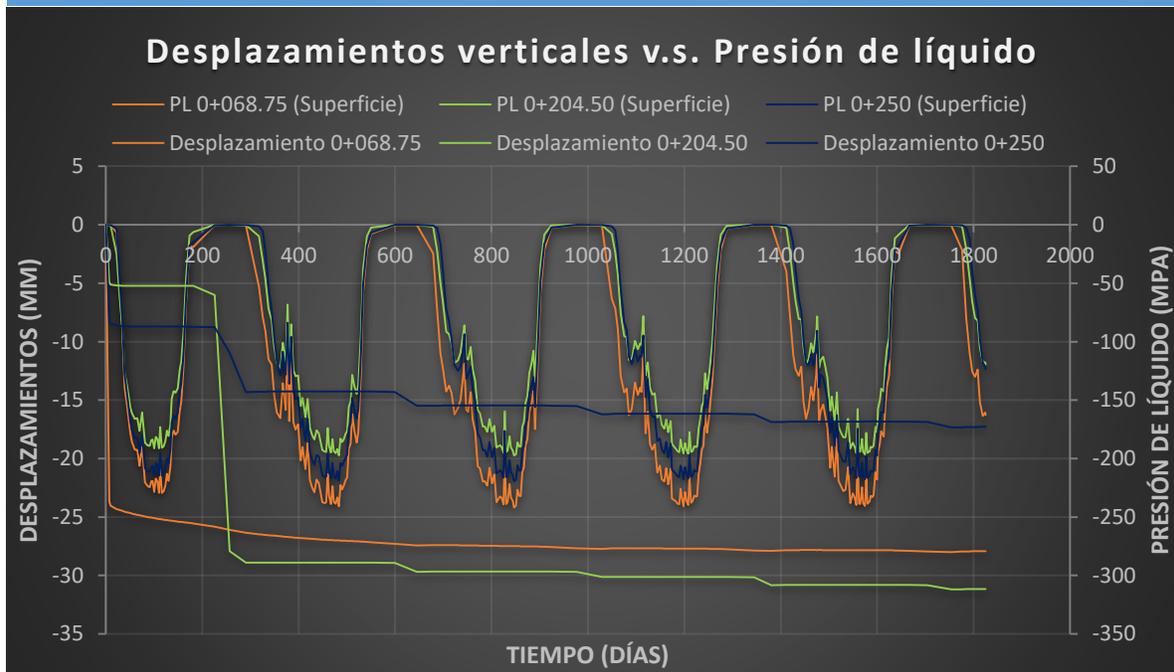


Figura 62 Evolución de los desplazamientos verticales vs la evolución de la presión del líquido en la superficie en diferentes cadenamientos para el CASO 6 (variante 1).

El colapso al comienzo de la simulación es debido a la carga aplicada y al espesor que tiene cada cadenamiento, pues como se puede observar en los puntos analizados, al disminuir la profundidad de la capa, el colapso inicial es menor.

#### 5.1.16 Aumento de esfuerzos por la irregularidad del pavimento

Con los perfiles obtenidos de las simulaciones, se calcularon los “aumentos en los esfuerzos” a partir de estos, con el modelo cuarto de carro. En la Figura 63 se muestra el aumento del esfuerzo en porcentaje calculado, en donde el caso 6 se obtuvo el máximo aumento de esfuerzos el cual fue de 25.28% en el cadenamiento 0+021.25.

Al considerar el aumento en los esfuerzos aplicados sobre el terraplén, las deformaciones sobre este aumentarán, generando perfiles con mayores irregularidades. Ya que los nuevos esfuerzos se calcularon a partir de la diferencia de los desplazamientos de 2 puntos consecutivos, se observa que los mayores aumentos de esfuerzo se presentan en la parte donde los perfiles tienden a ser más irregulares.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

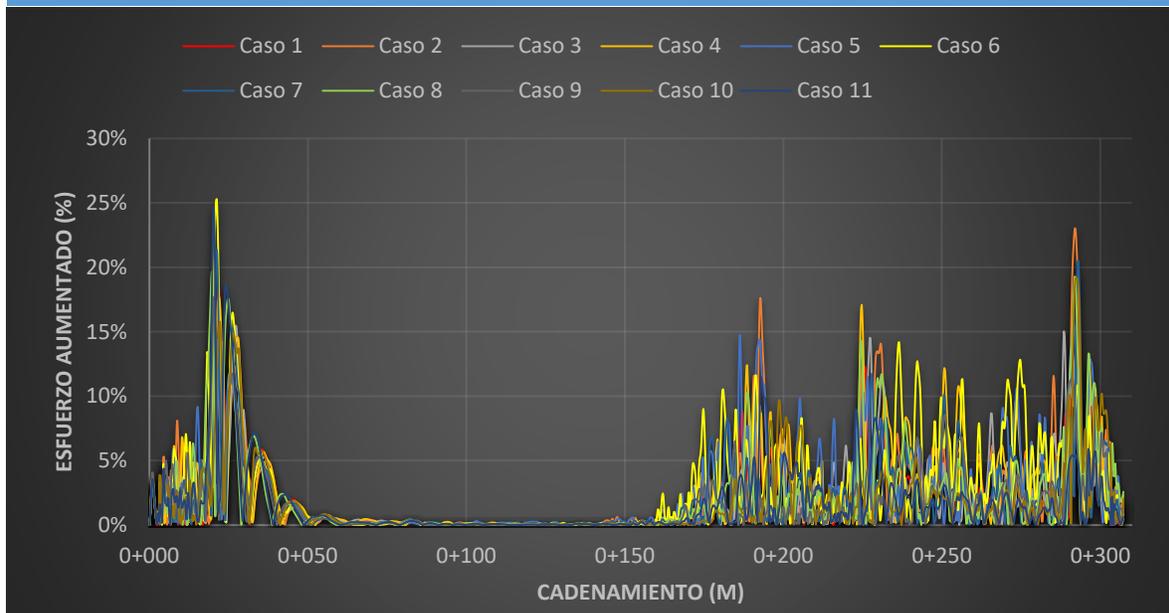


Figura 63 Resumen de esfuerzos aumentados para las simulaciones de la VARIANTE 1.

### 5.2 Simulaciones con Variante 2 ( $\sigma = 0.569$ MPa)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos cuando al perfil se le aplica un esfuerzo vertical de 0.569 MPa bajo las mismas condiciones de simulación que el apartado 4.3.

#### 5.2.1 Caso 1 (Sin porosidad aleatoria)

Este caso se realiza desde el programa GID, con la porosidad asignada de 0.593 (90 % del grado de compactación). En la Figura 64 se muestran los perfiles resultantes de las deformaciones verticales obtenidas.

Se puede observar que el perfil de desplazamientos evoluciona casi de una manera imperceptible, siendo la deformación en el primer año la que dictamina la configuración del perfil, la cual, tiende a tomar la forma del perfil del terreno, generando las mayores deformaciones en la parte de mayor espesor.

La deformación vertical máxima se presenta en el cadenamiento 0+071.25 con un valor de -360.94 mm. La deformación mínima ocurre en el mismo punto en el que se tiene el menor espesor, es decir en el cadenamiento 204.5 con un valor de -

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

118.38 mm. Por otro lado, en el cadenamiento de mayor espesor se registra una deformación vertical de -359.02 mm.

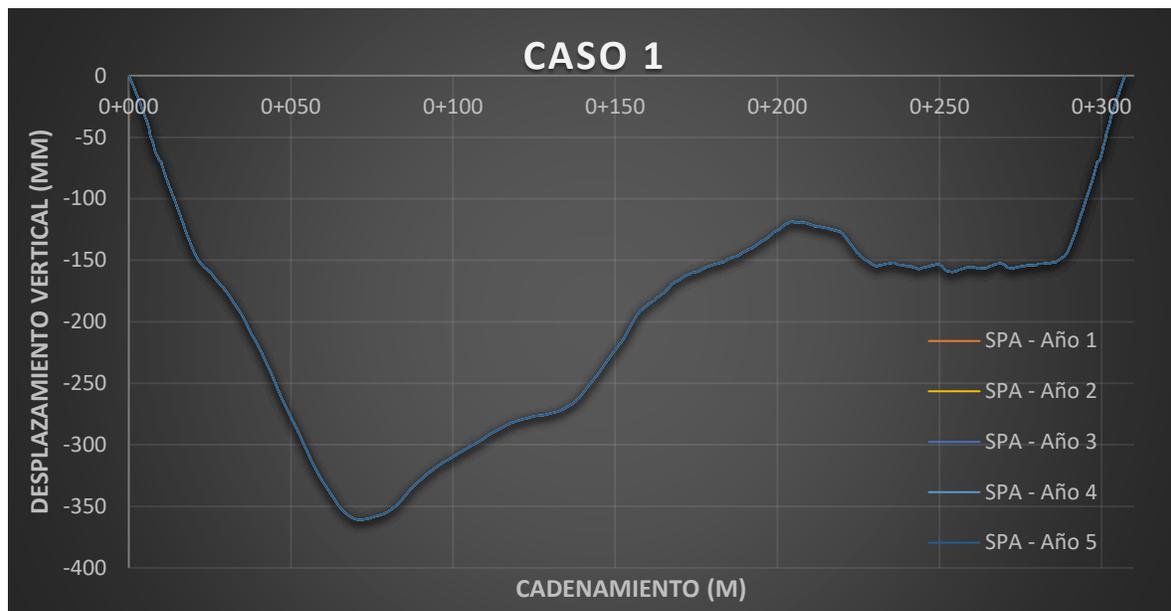


Figura 64 Evolución del perfil para la condición sin porosidad aleatoria.

De acuerdo con la configuración del perfil, el IRI calculado para el año 1 fue de 0.788 mm/m, mientras que, en el año 5 fue de 0.768 mm/m, reduciéndose así un 2.54%.

### 5.2.2 Caso 2 (Long= 16, Esp=0.05)

En la Figura 65 se observan los resultados obtenidos para este caso. La deformación vertical máxima ocurre en el cadenamiento 0+071, con un valor de -364.53 mm. La deformación en el punto con mayor espesor es de -363.05 mm. Por otro lado, la deformación en el espesor mínimo es de -119.26 mm al final de la simulación.

Como se ha mencionado anteriormente, el tramo del cadenamiento 0+230 al 0+285, se tiene un tramo relativamente constante en su espesor y en este se tiene la mayor irregularidad, como se puede observar en la Figura 65.

Los perfiles obtenidos en este caso presentan una evolución en sus desplazamientos en el tiempo casi nula, por lo que no se percibe en la figura ya que se encuentran sobrepuestos.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

El IRI obtenido en este caso fue de 1.133 mm/m para el año 1, el cual tuvo una reducción de solo el 0.88%, resultando en un IRI de 1.123 mm/m para el último año.

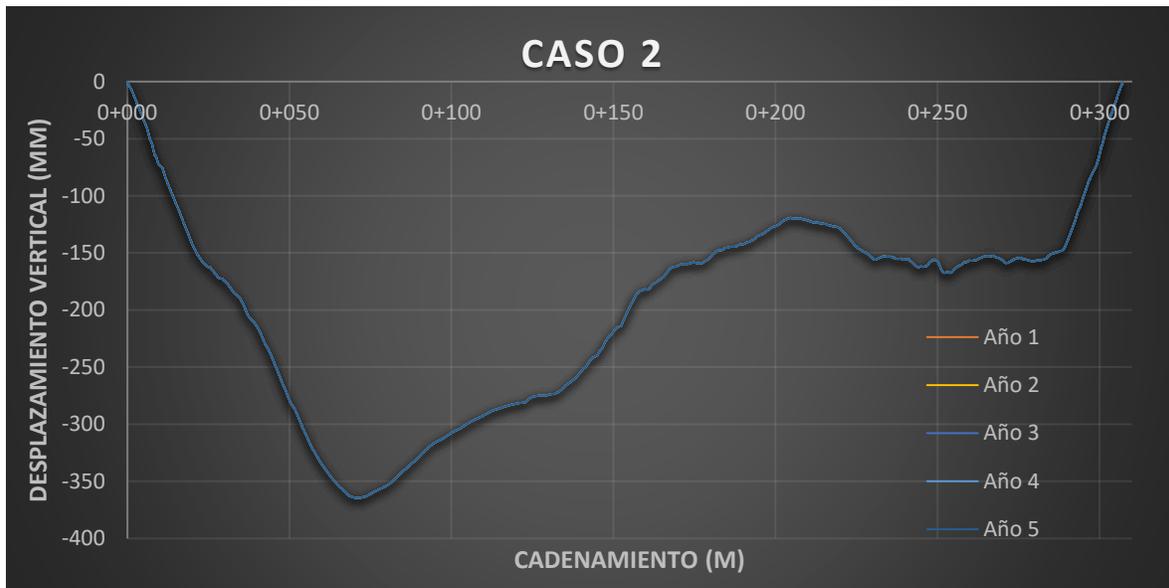


Figura 65 Evolución del perfil para el caso 2, con esfuerzo aplicado de 0.569 MPa.

### 5.2.3 Caso 3 (Long= 24, Esp=0.05)

El desplazamiento vertical máximo en este caso ocurre en el cadenamiento 0+071.75 con un valor de -364.72 mm. La deformación mínima es de -118.45 mm y ocurre en el mismo punto donde se encuentra el menor espesor. La deformación en el cadenamiento de mayor espesor fue de -361.87 mm. En la Figura 66 se muestran los perfiles de este caso, en el cual, la evolución de las deformaciones después del primer año es muy poca, por lo que no se aprecia en la figura.

EL cálculo del IRI arrojó como resultado en el primer año un valor de 0.893 mm/m, mientras que en el último año el valor de IRI fue de 0.886 mm/m, disminuyendo así un 0.78%.



Figura 66 Evolución del perfil para el caso 3, con esfuerzo aplicado de 0.569 MPa.

Los resultados obtenidos en los demás casos de estudio para la variante 2, presentan la misma configuración que los casos descritos anteriormente, es decir, no se observan variaciones perceptibles de los perfiles de deformación en el tiempo. Por ello, el análisis se continúa en la comparativa con todos los perfiles de los casos de estudio en el año 5.

#### 5.2.4 Evolución del IRI

Una vez calculado los IRI para cada caso, y para cada año, se obtuvo que el caso 5 presenta el mayor IRI para todos los años. Por el contrario, el menor IRI se registró en el caso 9.

Como se puede observar en la Tabla 21, los IRI calculados presentaron muy poca disminución, siendo la máxima presentada en el caso 1, con un 2.54 % de reducción.

Los casos en los que se presenta un mayor IRI, son en los que la Longitud Y (espesor) se mantiene constante de 0.05 m y se varía la Longitud X. En estos casos, la reducción del IRI en el tiempo no sobrepasa el 1% respecto al IRI del primer año.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Tabla 21 Resumen de los IRI obtenidos para las simulaciones con esfuerzo aplicado de 0.569 MPa.

<b>Variante 2 (<math>\sigma=0.569</math>)</b>							
<b>CASO</b>	Longitud X (m)	Longitud Y (m)	IRI (mm/m)				
			Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>1</b>	Sin porosidad aleatoria		0.788	0.775	0.772	0.769	0.768
<b>2</b>	16	0.05	1.133	1.128	1.126	1.123	1.123
<b>3</b>	24	0.05	0.893	0.891	0.889	0.887	0.886
<b>4</b>	33	0.05	1.147	1.144	1.141	1.138	1.136
<b>5</b>	<b>41</b>	<b>0.05</b>	<b>1.163</b>	<b>1.161</b>	<b>1.161</b>	<b>1.159</b>	<b>1.159</b>
<b>6</b>	50	0.05	1.031	1.029	1.027	1.024	1.023
<b>7</b>	50	0.1	0.984	0.98	0.977	0.974	0.974
<b>8</b>	50	0.15	0.827	0.824	0.82	0.816	0.816
<b>9</b>	50	0.2	<b>0.785</b>	<b>0.782</b>	<b>0.78</b>	<b>0.777</b>	<b>0.777</b>
<b>10</b>	50	0.25	0.907	0.903	0.901	0.898	0.896
<b>11</b>	50	0.3	0.839	0.836	0.834	0.831	0.83

Por el contrario, cuando se mantiene la Longitud X igual a 50 m, y se varía la Longitud Y (espesor), los IRI calculados tienden a ser menores, es decir, los perfiles obtenidos tienden a ser más regulares. Se observó que, en la obtención de los IRI para estos casos, estos tienen a disminuir más del 1% al final del periodo de evaluación (respecto al IRI del primer año).

### 5.2.5 Comparativa de los perfiles en el año 5

En la Figura 67 se incluyeron todos los perfiles de los casos de la variante 2. En esta figura podemos observar que las configuraciones de los perfiles resultantes de la simulación tienden a ser muy similares.

Del cadenamamiento inicial al cadenamamiento 0+021 (aproximadamente) se presenta un punto de inflexión, donde las deformaciones dejan de presentar un aumento de manera lineal.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Del cadenamiento 0+021 hasta el cadenamiento 0+160.25 (aproximadamente), se generan las mayores deformaciones verticales del perfil, generándose las máximas deformaciones después del punto de mayor espesor del perfil.

En el cadenamiento 0+160.25 se tiene un espesor inicial de 2.5 m, va disminuyendo hasta alcanzar el espesor mínimo inicial de 1.24 m en el cadenamiento 0+204.5; en este tramo, se pueden observar que los perfiles presentan mayor variación en su configuración que en el tramo anterior, generando pequeños “picos” que se pueden percibir en la Figura 67.

En el cadenamiento 0+204.5 se tiene el menor espesor inicial (1.24 m), en los metros cercanos a este punto, los perfiles tienden a ser similares, variando solo en el valor de la deformación para cada caso. Del cadenamiento 0+230 al 0+290 (aproximadamente) se presenta el tramo donde se generan las mayores irregularidades entre los perfiles, teniendo este tramo un espesor prácticamente similar en toda su longitud, siendo el espesor en el tramo inicial de 1.77 m y en el final del tramo de 1.55 m, con un espesor máximo de 1.94 m en el cadenamiento 0+252.25. Después del cadenamiento 0+289.5, las deformaciones tienden a disminuir de manera lineal, al igual que el espesor.

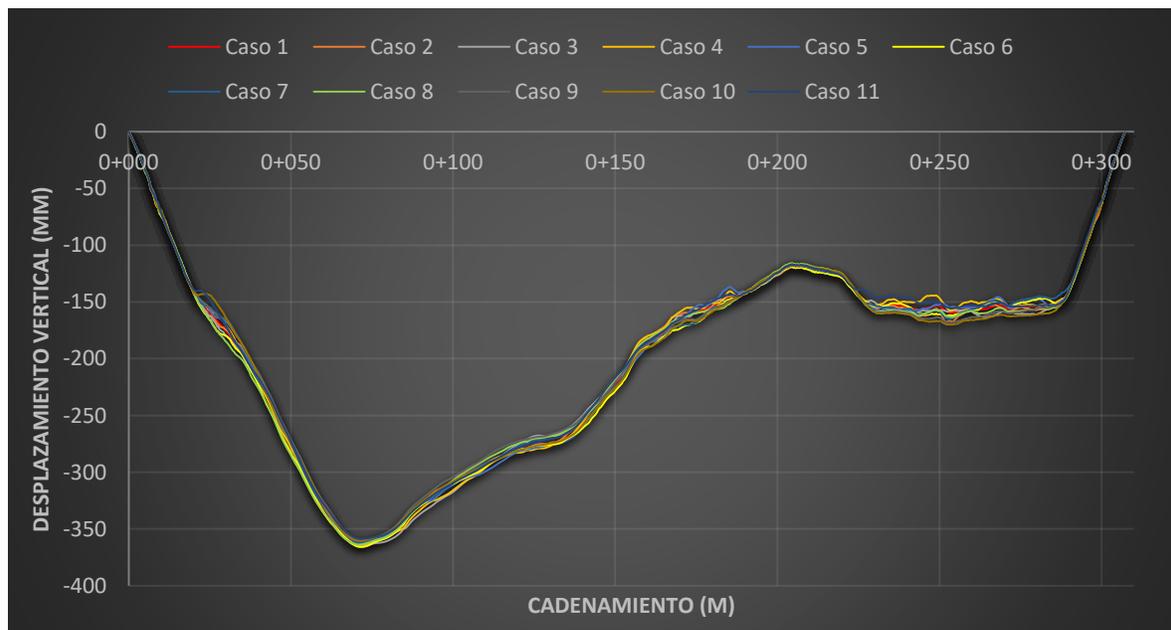


Figura 67 Perfiles obtenidos al final del tiempo de la simulación (Esfuerzo aplicado de 0.569 MPa).

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Debido al esfuerzo que es aplicado en la superficie, el perfil presenta la mayor deformación vertical desde el primer año, por lo que, en el tiempo restante de la simulación, las deformaciones registradas crecen muy poco. La deformación vertical máxima registrada fue de -365.93 mm, en el cadenamiento 0+071.5, del caso 6.

En estas simulaciones se pudo observar que los desplazamientos máximos ocurrieron cerca del espesor máximo. En la Tabla 22 se muestran los resultados de las deformaciones obtenidas para cada caso de estudio de la variante 2.

*Tabla 22 Deformaciones obtenidas para la VARIANTE 2.*

Casos	Desplazamiento máx. Cadenamiento	Mayor espesor (4.85m, 0+068.75) Menor espesor (1.24m, 0+204.5)		
		valor (mm)	valor (mm)	valor (mm)
1	0+071.25	360.94	359.02	118.38
2	0+071.00	364.53	363.05	119.26
3	0+071.75	364.72	361.87	118.45
4	0+071.00	363.96	361.91	118.31
5	0+071.50	362.34	359.69	117.96
6	0+071.50	365.93	362.87	118.64
7	0+071.75	362.19	359.35	117.78
8	0+070.75	363.82	362.28	115.65
9	0+071.75	360.48	357.39	117.52
10	0+071.25	360.43	358.65	116.80
11	0+071.75	358.68	356.20	116.75

Cabe destacar que el mayor colapso se produce debido a la carga aplicada para esta variante, pues este ocurre al comienzo de la simulación, aunque en todos los casos se registra un aumento significativo en la deformación vertical en el primer periodo de lluvias, no así en los siguientes periodos de lluvia. Esto lo podemos observar en la Figura 68, donde se presentan los desplazamientos y la *PI* en la superficie, en los cadenamientos de mayor y menor espesor del perfil, para el caso 2.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

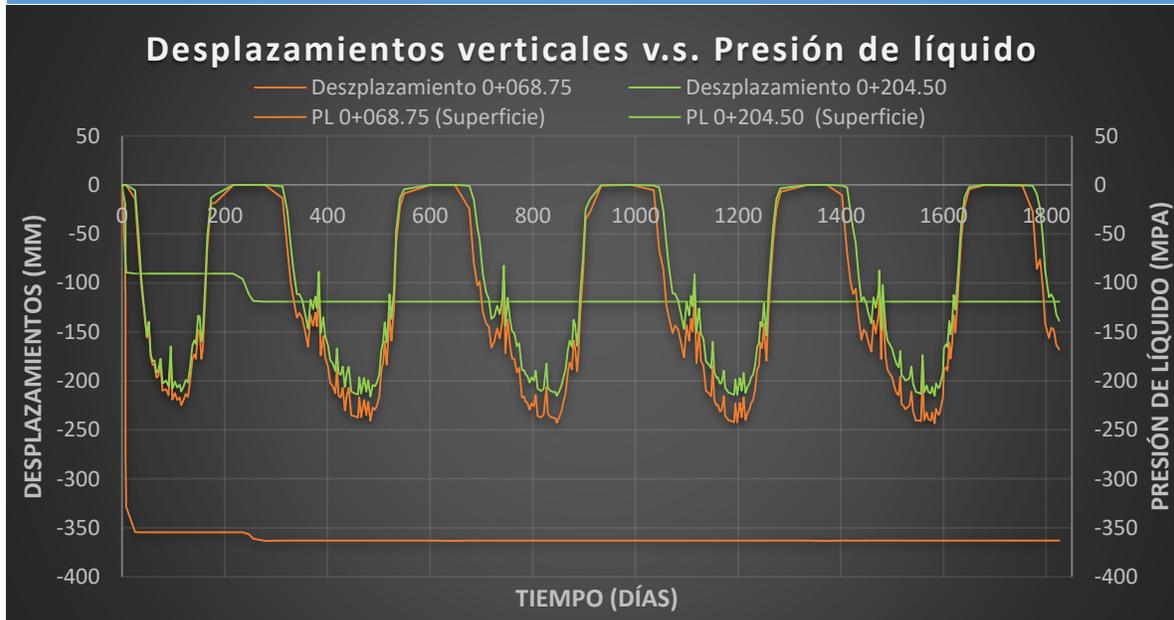


Figura 68 Evolución de los desplazamientos verticales vs la evolución de la presión del líquido en la superficie en diferentes cadenamientos para el CASO 2 (variante 2).

### 5.2.6 Agrupamiento de casos para la variante 2

Al igual que para la variante 1, se agruparon los casos en los que la Longitud X varía, mientras que la Longitud Y se mantiene constante a 0.05 m. Este grupo se presenta en la Figura 69, donde también se incluyó el caso 1 como referencia.

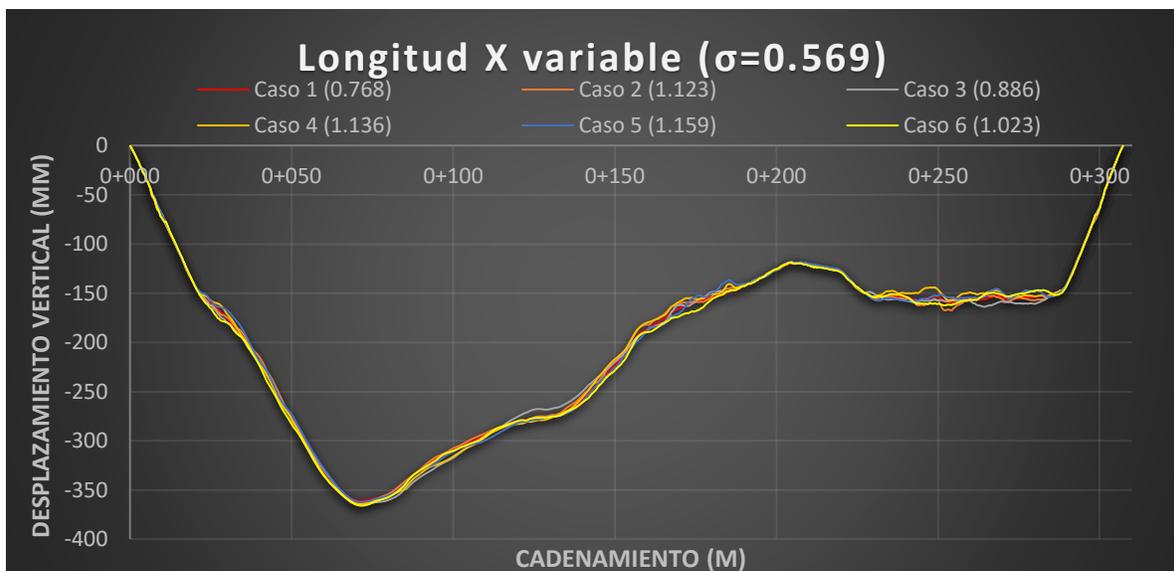


Figura 69 Perfiles de deformación con esfuerzo aplicado de 0.569 MPa a distintas Longitudes en X y un espesor de 0.05 m.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

En este grupo se presenta el caso en el cual se registra el mayor IRI con esta variante que fue el caso 2. Como se puede observar en la Figura 69, existen varios tramos donde los perfiles presentan diferencias evidentes, siendo el más notorio el tramo del cadenamiento 0+230 al 0+289.5. Los demás tramos son del cadenamiento 0+021 al 0+036 (aproximadamente, dependiendo del caso) y del cadenamiento 0+160.25 al 0+192.25 (aproximadamente, dependiendo del caso).

En la Figura 70 se agruparon los casos en los que la Longitud Y (espesor) varía, mientras que la Longitud X se mantiene constante igual a 50 m. Los perfiles obtenidos en estos casos presentan una configuración en la que las irregularidades no son tan notorias, y ello se ve representado en los IRI calculados para estos casos. Al igual que el grupo anterior, se presentan varias zonas donde la configuración de los perfiles es más notoria.

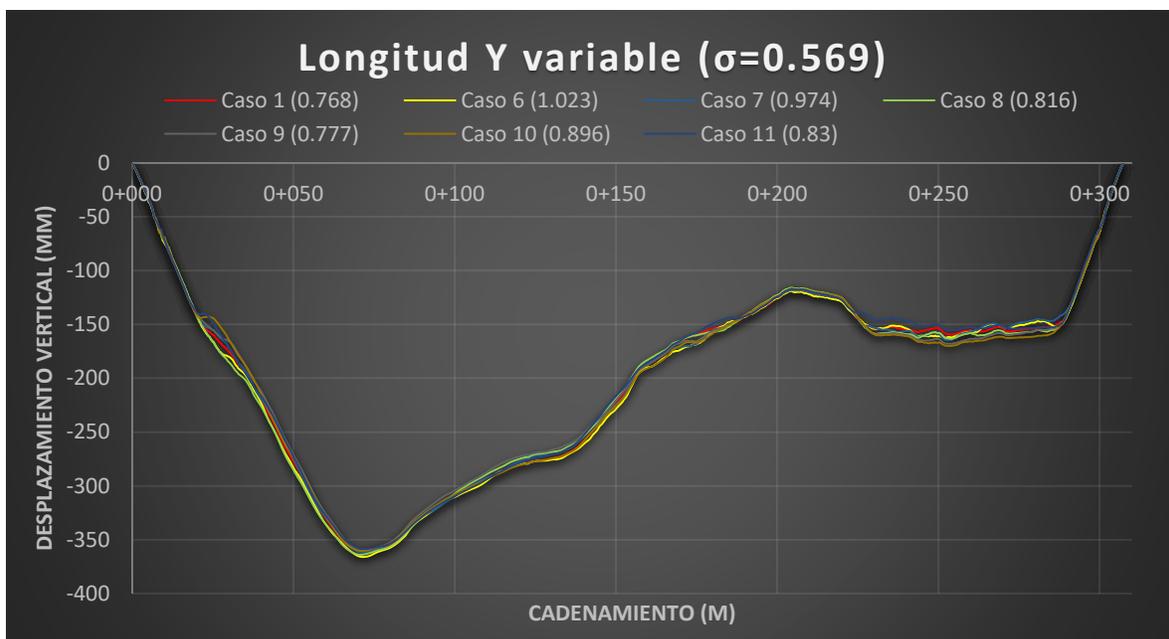


Figura 70 Perfiles de deformación con esfuerzo aplicado de 0.569 MPa a distintas Longitudes en Y y una Longitud en X de 50 m.

En los perfiles obtenidos en ambas variantes, se puede observar que el parámetro que afecta o contribuye a un aumento en el IRI es el parámetro de la Longitud X, ya que al variar la longitud del modelo del variograma en esta dirección genera perfiles con mayores irregularidades. Por el otro lado, al mantener la Longitud X igual a 50

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

y variar Longitud Y (espesor) los perfiles obtenidos tienen a ser más regulares y esto se observa en la Figura 54 y la Figura 70 y en la obtención de IRI menores.

### 5.2.7 Aumento de esfuerzos por la irregularidad del pavimento

Al igual que en las simulaciones realizadas para la variante 1, se obtuvieron los “aumentos en los esfuerzos” a partir del perfil al final de la simulación (año 5). En la Figura 71 se presentan los aumentos de esfuerzos calculados, donde, en el caso 10 se obtuvo el máximo aumento de esfuerzos el cual fue de 13.84% en el cadenamiento 0+010.

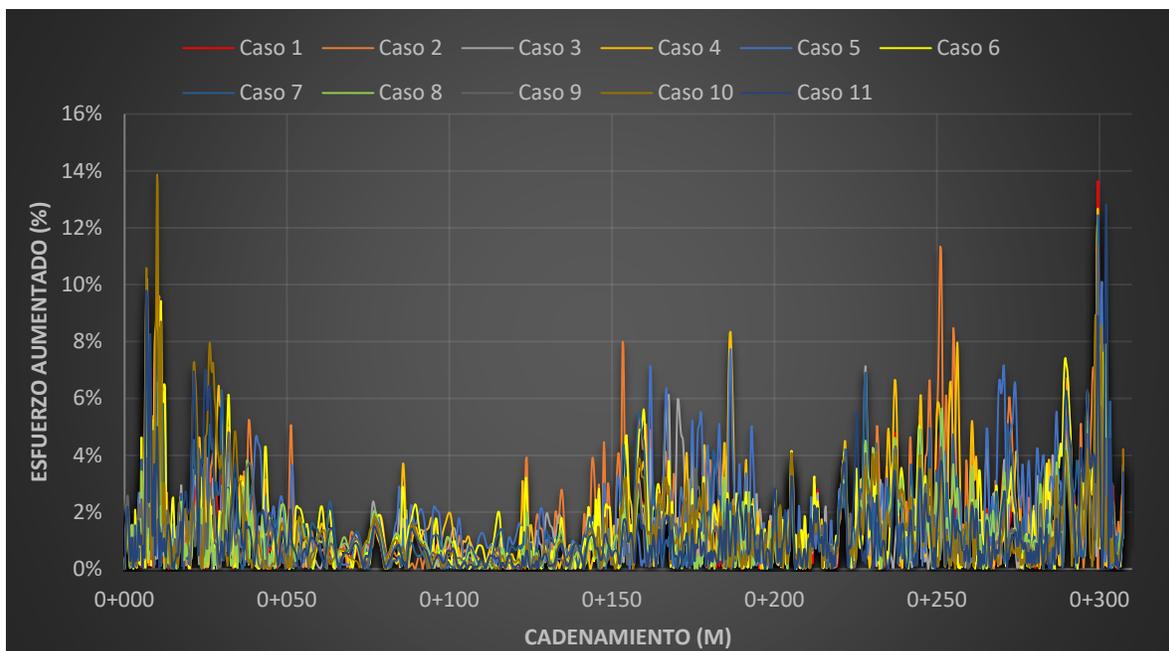


Figura 71 Resumen de esfuerzos aumentados para las simulaciones de la variante 2.

### 5.3 Comparativa de los casos de estudio más críticos en ambas variantes.

Con el fin de realizar un análisis comparativo, en este apartado se presentan los casos más representativos para cada variante, en los cuales, se incluye el perfil original.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

En la Figura 72 se observan los perfiles obtenidos para el caso 1. El IRI para la variante 1 fue de 0.803 mm/m y para la variante 2 fue de 0.768 mm/m al final de la simulación.

En el perfil obtenido para la variante 2 se generan deformaciones mucho mayores que en la variante 1, esto debido al mayor esfuerzo aplicado en la variante 2, como se puede observar en la Figura 72, donde la escala de la derecha corresponde a los desplazamientos de los casos en milímetros, mientras que la escala de la izquierda corresponde a la escala del perfil en metros.

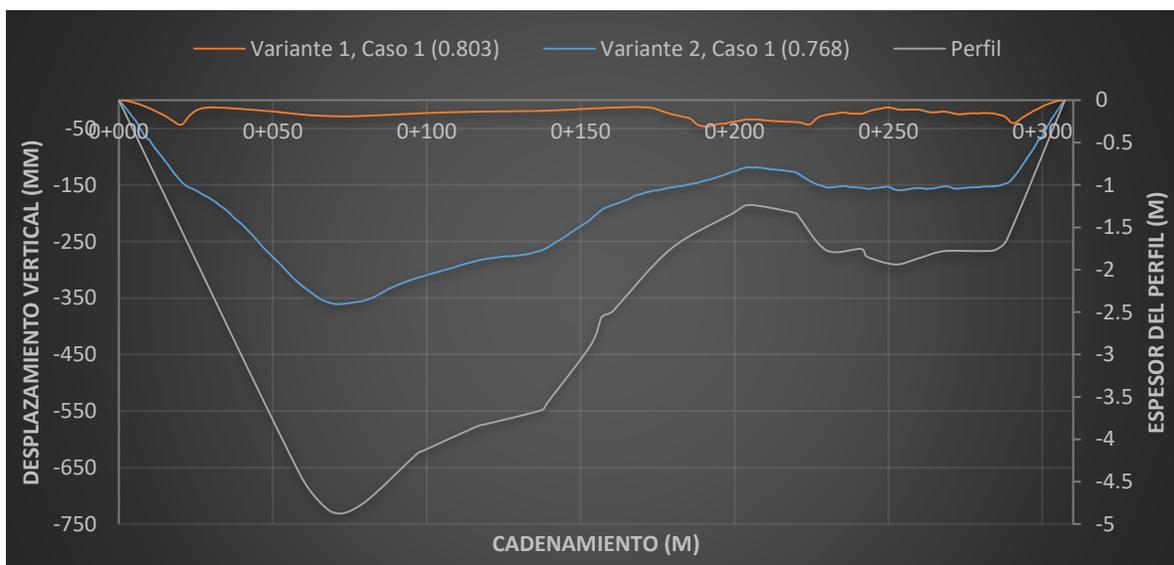


Figura 72 Comparación del Caso 1 para ambas variantes.

Ya que el caso más crítico en las simulaciones con la variante 1 fue el caso 6, se presenta el perfil al final de la simulación de este para ambas variantes en la Figura 73, en la cual también se incluye el perfil del terreno. En la variante 1, el IRI calculado, fue de 1.158 mm/m, mientras que en la variante 2 se obtuvo un IRI de 1.023 mm/m al final de la simulación para este mismo caso.

En el caso de la variante 1, se puede observar como el perfil se vuelve más irregular en el tramo comprendido entre el cadenamiento 0+184 al cadenamiento 0+290.5.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

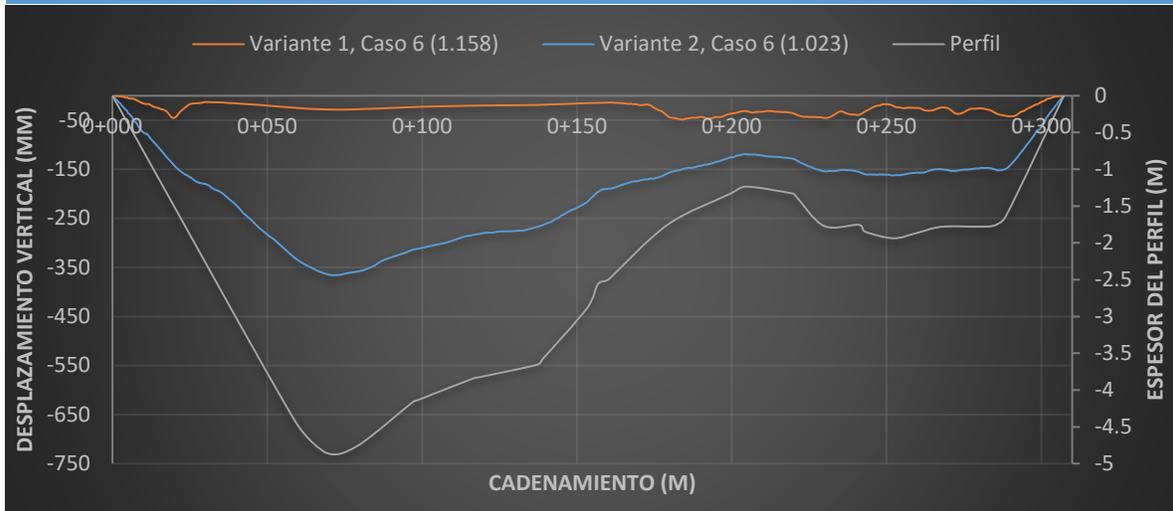


Figura 73 Comparación del CASO 6 para ambas variantes.

En las simulaciones realizadas con la variante 2, el caso más significativo fue el caso 5, por ello, en la Figura 74 se presentan el caso 5 para ambas variantes, siendo que en la variante 2 se registró el mayor IRI en este caso con un valor de 1.159 mm/m y el IRI para la variante 1 en este caso fue de 1.095 mm/m al final de la simulación.

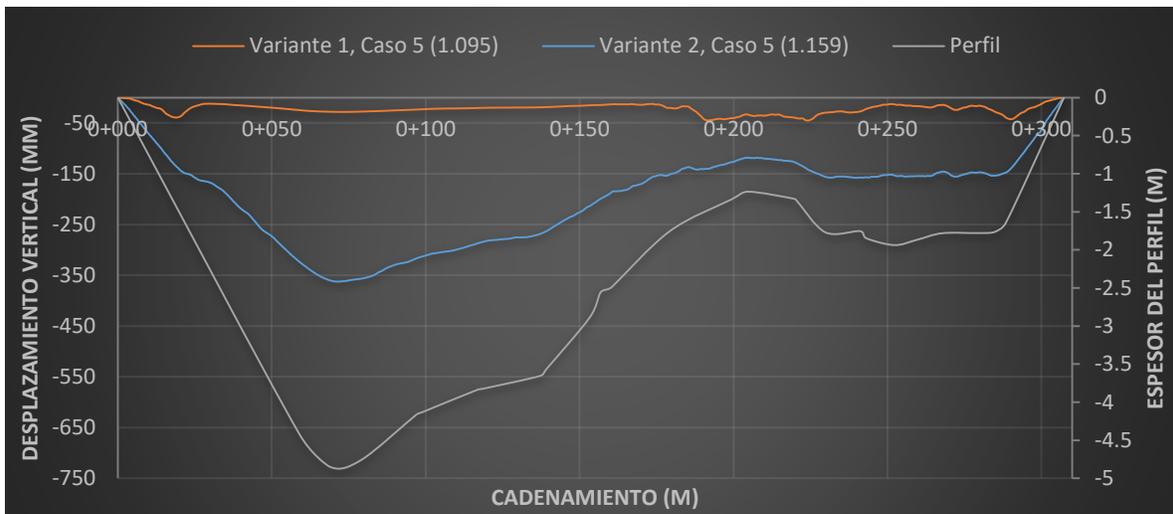


Figura 74 Comparación del CASO 5 para ambas variantes.

Al tener un esfuerzo aplicado como en la variante 1, el perfil no sigue la configuración del terreno natural, siendo que las deformaciones de mayor valor ocurren en los espesores menores a 1.5 aproximadamente.

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

Se observa así pues en las figuras anteriores la diferencia significativa que existe en los perfiles obtenidos al final de la simulación, notándose que, al aumentar el esfuerzo vertical aplicado en la superficie, esto se traduce en deformaciones de mayor magnitud y las cuales seguirán la configuración del terreno natural.

### 5.4 Perfil promedio

En este trabajo se aplicaron los esfuerzos de manera uniforme sobre la superficie de la sección longitudinal, pero en la realidad, esto no ocurre pues los esfuerzos recibidos en las terrecerías son variados, por lo que, se decidió promediar todos los casos de ambas variantes (al final de la simulación) en un “perfil promedio”, el cual se presenta en la Figura 75.

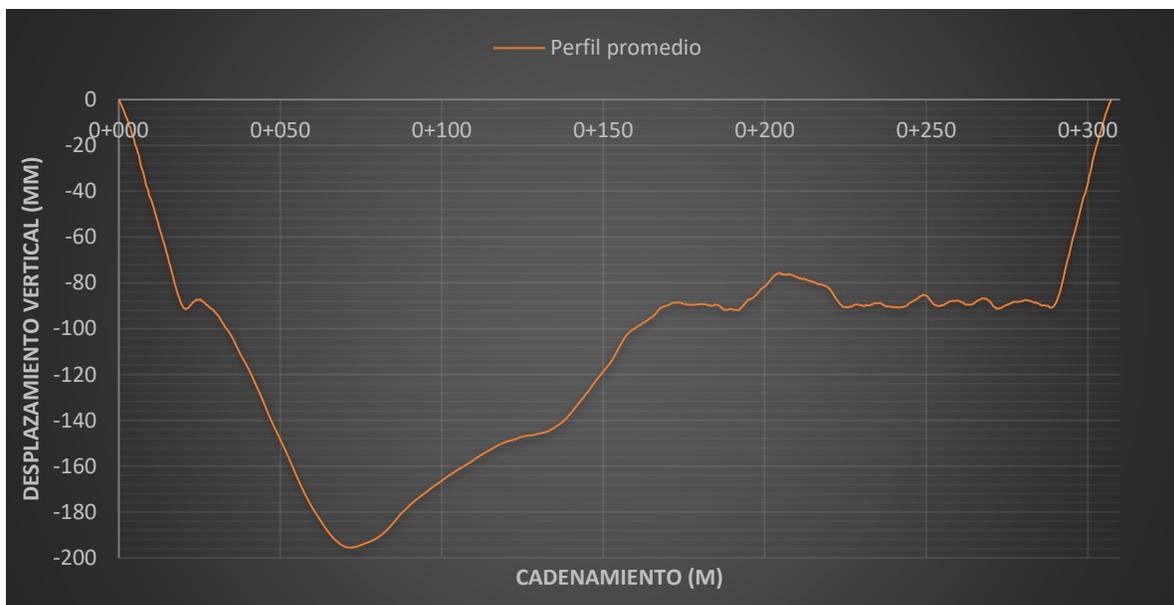


Figura 75 Perfil promedio de todas las simulaciones de las 2 variantes.

Al generar el Perfil promedio, el IRI resultante fue de 0.615 mm/m. Este bajo valor de IRI es debido a que, al promediar los perfiles de ambas variantes, resulta en un perfil más suavizado, es decir, los desplazamientos verticales resultantes generan un perfil más regular.

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se realizó un estudio de sensibilidad de la variación espacial del grado de compactación en un terraplén longitudinal. Se utilizaron modelos numéricos construidos en el programa Code Bright en el cual se implementaron las condiciones climáticas. Se observó la influencia de los parámetros en la operatividad del camino por medio de la modificación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). A continuación, se presentan las conclusiones extraídas de los resultados de este trabajo.

- Las deformaciones obtenidas en el primer año de simulación, en específico, después de una temporada muy marcada de lluvias como lo fue en esta investigación, marcarán claramente el perfil de deformación que se presentará a lo largo del tiempo, siendo que la mayor deformación ocurrirá en el primer año.
- En los perfiles obtenidos para la variante 1, se puede observar con mayor claridad cómo evolucionan las deformaciones al paso de los años, no así en los perfiles de la variante 2, esto debido al mayor esfuerzo aplicado.
- El aumento de esfuerzo de la variante 1 a la variante 2, aunque sea un aumento pequeño (de 60% aproximadamente), resultó en un aumento muy significativo (aproximadamente 7 veces más) de los desplazamientos verticales en los perfiles obtenidos a lo largo de la simulación.
- La implementación de los variogramas por medio de la porosidad en este trabajo es importante, dado que, en la práctica, se presentan variaciones en el grado de compactación dentro del cuerpo de los terraplenes. Este es un tema muy poco abordado dentro de la ingeniería de caminos, ya que existen muy pocos estudios en este ámbito, siendo que éste es muy importante para tomar mejores consideraciones dentro de los procesos constructivos de los terraplenes.
- Para esta investigación, el efecto de la variabilidad del grado de compactación es más evidente y notoria a partir del cadenamiento 0+170 al cadenamiento 0+290, que es un tramo donde los espesores oscilan de 1.24 m a 1.94 m, puesto que en este tramo se obtuvieron configuraciones muy aleatorias en los perfiles de desplazamientos verticales para ambas variantes. Por otro lado, en el tramo

de mayores espesores (más de 2 metros de espesor) la variabilidad espacial del grado de compactación no refleja una influencia importante, ya que las deformaciones verticales tienden a generarse de manera homogénea a lo largo del perfil, presentándose las mayores en la parte de mayor espesor.

- La variabilidad el grado de compactación en la Longitud X demostró ser la más influyente en la generación de perfiles más irregulares, pues en estas simulaciones, los IRI calculados fueron los mayores.
- De acuerdo a la clasificación de tramos carreteros en México, los IRI obtenidos de las simulaciones resultaron en valores bajos, estando todos dentro del concepto de “Buenos”. Pero cabe resaltar, que estos resultados son solo sobre el perfil de las terracerías, es decir, al obtener el IRI en la superficie del pavimento, podrá ser mayor, debido a las deformaciones verticales en las terracerías y a los deterioros propios del pavimento.
- Los IRI obtenidos en las simulaciones con la variante 1 resultaron en reducciones del 3.88% hasta 12.7% al final de la simulación, respecto al IRI en el primer año; por otro lado, en las simulaciones con la variante 2 la reducción del IRI fue de 0.34% hasta 2.54%. Esto es debido al esfuerzo aplicado pues en la variante 2, al ser mayor, la deformación vertical mayor ocurre en el primer año de simulación, por lo que el suelo sufre poco desplazamiento vertical después del año 1, lo que provoca una modificación mínima en su IRI.
- Los esfuerzos aplicados en este trabajo fueron de manera uniforme en toda la simulación, pero al presentarse el colapso en el primer año, se genera un nuevo perfil, por lo que los esfuerzos aumentarán, en mayor medida, en las partes de mayor irregularidad, lo que propiciaría diferencias en los perfiles de desplazamiento que se generen en los siguientes años. Se pudo observar las pequeñas irregularidades que se presentan generan variaciones adicionales en las cargas uniformes aplicadas, con un incremento hasta del 25%. En realidad, los esfuerzos aplicados sobre la superficie del terraplén son variados, por lo que es de esperarse que se presenten más irregularidades, y por ende mayores IRI.
- La producción del colapso en la primera temporada de lluvias es el más significativo y propicia que en las siguientes temporadas, pasando previamente

por un periodo de secas, el grado de saturación alcanzado, sea menor, pues el terreno se encuentra en un estado más compacto, por lo que se necesitaría que el periodo de lluvias fuese más prolongado o con mayores intensidades para poder alcanzar un grado de saturación similar al de la primera temporada de lluvias.

- Para el suelo utilizado en esta investigación, los mayores cambios en el contenido de agua y presión del líquido ocurrían en la interfaz suelo-atmosfera, en la zona activa, la cual para este caso se situó cerca de los 2 metros de profundidad, pues en las zonas menores a este espesor, la modificación del contenido de agua estaba dada por el cambio en las condiciones climáticas impuestas.
- La implementación de las herramientas computacionales que existen actualmente para el entendimiento del comportamiento de los suelos parcialmente saturados, como lo es Code Bright, nos permiten realizar modelos numéricos acoplados termo-hidro-mecánico, donde se considera la interacción existente entre todos los mecanismos que interfieren en el colapso estructural de un terreno.
- Las simulaciones pueden representar la problemática en la superficie del pavimento ocasionando asentamientos, cambios en la sección del camino que conlleva a costos adicionales de mantenimiento, y afecta las condiciones adecuadas de operación de la vía.

En este trabajo se ha notado la importancia de la consideración de la interacción suelo-atmosfera, y las implicaciones que tiene en el entendimiento del comportamiento de un terraplén que se encuentra en un estado parcialmente saturado. Asimismo, se observó la susceptibilidad estructural del terreno a las condiciones medio ambientales. Al modificarse el grado de saturación y por ende la succión, como puede ser en un periodo de lluvias muy marcado, como lo fue en esta investigación, la estructura interna del terreno tiende a modificarse (colapsar). De esta manera, después de un periodo de equilibrio en el terreno, la respuesta de este dependerá directamente de las condiciones climáticas que se presenten a lo largo

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

del tiempo, siendo la cantidad y durabilidad de la precipitación, la principal variable climática que marque la respuesta del terraplén.

## 7 TRABAJOS FUTUROS

Como parte final de este trabajo, se plantean las siguientes actividades a realizarse como continuación de esta línea de investigación.

- Realizar estudios de variabilidad del grado de compactación dentro de las capas del cuerpo del terraplén y la calibración de un modelo variográfico para su utilización en el programa desarrollado en este trabajo de investigación.
- Instrumentación de un terraplén para la medición de los asentamientos verticales, la presión de líquido y la distribución de los esfuerzos verticales con la profundidad a lo largo de un periodo de tiempo determinado, para calibrar y validar el modelo numérico.
- Implementación de la metodología desarrollada en esta investigación en un caso real de un terraplén en sección longitudinal, con el propósito de analizar la respuesta del terraplén y realizar las acciones necesarias para mantener las condiciones estructurales de manera adecuada.
- Realizar la modificación en los esfuerzos aplicados sobre el terraplén, a partir del perfil de deformación del primer año, ya que en esta investigación se observó que los esfuerzos aplicados aumentan su valor al presentarse irregularidades sobre la superficie de las terracerías.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

Alonso, E.E. (1998). "Suction and Moisture Regimes in Roadway Bases and Subgrades". Simposio Internacional: Drenaje Interno de Firmes y Explanadas. pp. 57-104. Granda, España.

Alonso, E.E., Gens A., & Josa, A. (1990). "A constitutive model for partially saturated soils". *Geotechnique*, 40, 3:405-430.

Alonso, E. E., Pinyol, N.M., & Puzrin, A.M. (2010). "Geomechanics of failures". Advanced topics. Springer Science & Business Media.

Álvarez Lima, R. (2012). "Comportamiento y simulación de terraplén carretero construido con arcillas expansivas". [Tesis doctoral. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Chihuahua, México].

Arriaga, M., Garnica, P., & Rico, A. (1998). "Índice internacional de rugosidad en la red carretera de México". Publicación Técnica No. 108, Instituto Mexicano del Transporte.

Barrera, M., (2004). "Estudio experimental del comportamiento hidromecánico de suelos colapsables". Publicación Técnica No. 226, Instituto Mexicano del Transporte.

Barrera, M., & Garnica, P. (2002). "Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres". Publicación Técnica No. 198, Instituto Mexicano del Transporte.

Belloso Garrido, O. (2012). "Modelación de asentos en un terraplén causados por la lluvia". [Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España].

Carosio, A., & Etse, G. (1996). "Integración Constitutiva de Modelos Basados en la Teoría Elastoviscoplastica de Perzyna". *Mecánica Computacional*, 17(6), 413-422.

Chávez, C., Espinosa, J.J., Alarcón, J., & Arreygue, J.E. (2016). “Colapso por humedecimiento en los terraplenes de la autopista Pazcuaro-Uruapan”. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 17(2), 201-210.

Das Braja M. (2001). “Fundamentos de ingeniería geotécnica”. Thomson Editores, México, DF.

García Castaño, E. (2012). “Cambios de contenido de agua en terraplenes bajo acciones climáticas el caso del terraplén de Carmaux”. [Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España].

Garnica P., y Ramírez J.A. (2014). “Gestión de terraplenes y riesgos ante la inestabilidad”. Publicación Técnica No.423, Instituto Mexicano del Transporte.

Oscóz Pérez, S. (2016). “Estudio de la respuesta de un terraplén bajo acciones climáticas”. [Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España].

Proctor, R.R. (1933). “Fundamental Principles of Soil Compaction”. *Engineering News Record* III.

Rico, A., & Del Castillo, H. (1995). “Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Carreteras, Ferrocarriles y Aeropista” Vol1. Limusa, México, DF.

Le, T. M. H., Gallipoli, D., Sanchez, M., & Wheeler, S. J. (2012). “Stochastic analysis of unsaturated seepage through randomly heterogeneous earth embankments”. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(8), 1056-1076.

Sherman, G. B., Watkins, R. O., & Prysock, R. H. (1967). A statistical analysis of embankment compaction. *Highway Research Record*, (177).

Espinoza Arreola, J.D.J. (2014). “Determinación de deformaciones verticales en terraplenes debidas a la saturación”. [Tesis de maestría, Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo. Morelia, Michoacán].

Davis, F. J. (1953). "Quality Control of Earth Embankments". Proc. Third Internat. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, Zurich.

Matheron, G. (1963). "Principios de geoestadística". Geología económica. 58 (8): 1246-1266. doi : 10.2113 / gsecongeo.58.8.1246 . ISSN 1554-0774

Webster, R. & Oliver, M.A. (2007). "Geoestadística para científicos ambientales", John Wiley & Sons.

Cressie, N., (1993). "Estadísticas para datos espaciales", Wiley Interscience.

Chiles JP, & P. Delfiner. (1999). Geoestadística. "Modelado de incertidumbre espacial". Wiley-Interscience.

Sebastian Müller & Lennart Schüler. GeoStat-Framework / GSTools. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1313628>

Emery, X. (2013). "Apunte de geoestadística". Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Perzyna, J.K. (1996). "Fundamental problems in viscoplasticity". Advances in Appliend Mechanics, Academic press, New York. 9, 243–377.

Desai, C.S & Zhang, D. (1987). "Viscoplastic model for geologic materials with generalized flow rule". Int. J. Num. Anal. Methods in Geomech. Vol 11, issue 6, pp. 603-260.

Department of Civil and Environmental Engineering. (2020). CODE\_BRIGHT Tutorial Manual. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona tech. España.

Department of Civil and Environmental Engineering. (2020). CODE\_BRIGHT User's Guide. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona tech. España.

Sayers, M.W., Gillespie, T.D. & Paterson, W.D.O. (1986). "Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurement Banco Mundial". Technical Paper 46.

Sayers, M.W., Gillespie, T.D. & Queiroz, C.V. (1986). "The International Road Roughness Experiment. Banco Mundial". Technical Paper 45.

Sherman, G. B., Watkins, R. O., & Prysock, R. H. (1967). "A statistical analysis of embankment compaction". Highway Research Record, (177).

SCT. (2002). Norma N-CMT-1-01-02. "Materiales para terraplén". México.

SCT. (2003). Manual M-CAL-1-03-03. "Análisis Estadísticos de Control de Calidad". México.

SCT. (2016). Norma N-CSV-CAR-1-03-004. "Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI)". México.

Van Genuchten, M.T. (1980). "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils". Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.

Zepeda J.A. (Ed.). (2004). "Mecánica de Suelos no saturados". Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México, DF.

## 9 ANEXOS

### 9.1 ANEXO 1

#### 9.1.1 Programa para la obtención de las porosidades aleatorias

##### Lectura del archivo.

```
Nombre='Nombre_del_archivo_gri.dat'
f = open(Nombre , 'r')
# get array of lines
f_content = f.readlines()
f.close()

NoDeNodos=10259 # último valor de los nodos
NoDeElementos=9336
NoDeConIni=2
NoDeEsfuerzosIni=2
PosIni=NoDeNodos+NoDeElementos+NoDeConIni+NoDeEsfuerzosIni+1

#Lectura de los Nodos
inicio=1
fin=NoDeNodos+1
Coords=np.zeros((NoDeNodos,2))
con=0
for i in range(inicio,fin):
    D1=f_content[i].split()
    N1=float(D1[1])
    N2=float(D1[2])
    Coords[con,:]=np.array([N1,N2])
    con+=1
#Lectura de los elementos
inicio=NoDeNodos+1
fin=inicio+NoDeElementos

Elementos=np.zeros((fin-inicio,4),dtype=int)
con=0
for i in range(inicio,fin):
    D1=f_content[i].split()
    N1=float(D1[3])
    N2=float(D1[4])
    N3=float(D1[5])
    N4=float(D1[6])
```

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

```
Elementos[con, :]=np.array([N1,N2,N3,N4])
con+=1
# Cálculo de los centroides para generar la porosidad aleatoria para
cada elemento
NumPuntos=4
Centroides=np.zeros((len(Elementos[:,0]),2), dtype=float)
NumElem=len(Elementos[:,0])
for i in range(0,NumElem):
    xi=sum(Coords[Elementos[i]-1,0])/NumPuntos
    yi=sum(Coords[Elementos[i]-1,1])/NumPuntos
    Centroides[i, :]=np.array([xi,yi])
```

### Generación de números aleatorios en rectángulo.

```
x=np.linspace(0,310,700)
y=np.linspace(0,5,100)

Xi,Yi=np.meshgrid(x,y,indexing='ij')

#Gaussian
model = gs.Gaussian(dim=2, var=0.0005, nugget=0, len_scale=[50,0.10],
angles=np.radians(0))
srf = gs.SRF(model,mean=0.593)
srf((x, y), mesh_type='structured')
plt.figure(figsize=(10,3))
cs=plt.contourf(Xi,Yi,srf.field)
cbar=plt.colorbar(cs)
cbar.ax.set_ylabel('Porosidad')
plt.grid()
plt.show()

#Se genera la función de interpolación
z = srf.field
f=interpolate.RectBivariateSpline(x,y,srf.field)
```

### Interpolación de los valores para los centroides de los elementos.

```
Poros=np.zeros(len(Centroides[:,0]))
# Se interpolan los valores
for (i,punto) in enumerate(Centroides):
    Poros[i] = f(punto[0],punto[1])

cmap = cm.get_cmap('viridis')
```

## Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

```
norm = mcolors.Normalize(srf.field.min(), srf.field.max())
colors = cmap(norm(Poros))

plt.figure(figsize=(15,3))
for (i,elemento) in enumerate(Elementos):
    puntos=Coords[elemento-1,:]
    plt.fill(puntos[:,0],puntos[:,1],c=colors[i],ec='k',lw=0.1)
plt.grid(alpha=0.5)
plt.xlim(50,100)
plt.show()
```

### Modificación y gravado del archivo.

```
# Se Modifica el archivo original
data=Poros
f = open(Nombre , 'r')
f_content = f.readlines()
f.close()
# Se parte el string del renglón de las porosidades
D1=f_content[PosIni].split()
# Se guardan los valores para sustituir
N1=D1[0]
N2=D1[1] #Es el valor de la porosidad inicial
#Se reemplaza el primer valor de la porosidad
Var=[f_content[PosIni].replace(N2,str(data[0]))]
# Se agregan las porosidades aleatorias y se crea un vector más gran
de
for i in range(1,len(data)):
    # Genera el número del elemento i
    Var1=f_content[PosIni].replace(N1,str(i+1))
    # Genera la porosidad del elemento i
    Var2=Var1.replace(N2,str(data[i]))
    #Agrega los valores
    Var.append(Var2)

f_content.pop(PosIni) #Renueve uno de los renglones
f_content.pop(PosIni) #Renueve el segundo renglón
for i in range(0,len(data)):
    f_content.insert(PosIni+i,Var[i])#Inserta la nueva lista de valores

#Se Grava el archivo
archivo = open("copia.dat",'w')
archivo.writelines(f_content)
```

Cuantificación de las deformaciones volumétricas en terraplenes por efecto del clima y su influencia en la operatividad de la vía

archivo.close()