

Evaluación de asentamientos diferidos en el tiempo en el relleno sanitario el Carrasco de la
ciudad de Bucaramanga

Erika Nathalia Galvis Carvajalino y Ivan Leonardo Santisteban Velasco

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Vladimir Ernesto Merchan

PhD. en Ingeniería

Codirector

Álvaro Viviescas Jaimes

PhD. en Estructuras

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto a Dios por brindarme sabiduría, paciencia y constancia para sacar adelante mi carrera. A mis padres, Elvia Stefany Carvajalino Chogo y Tilson Huertas Briñez, por ser mi apoyo y amor incondicional en este largo camino. A mi hermana, María Paula Huertas Carvajalino, por siempre estar para mí, dándome ánimos. A mi familia y pareja por brindarme su ayuda y comprensión.

Erika Nathalia Galvis Carvajalino

Agradecimiento a mis seres queridos, quienes con su amor, paciencia y apoyo incondicional han estado a mi lado en cada paso de este camino. A mis padres, por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación; y a mis amigos, por su constante ánimo y compañía en los momentos más desafiantes. Este logro es el fruto del esfuerzo conjunto.

Ivan Leonardo Santisteban Velasco

Agradecimientos

Expresamos nuestra gratitud a nuestros directores de Proyecto de grado el Ing. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes Ph.D y Álvaro Viviecas Jaimes Ph.D. por su comprensión, tiempo y dedicación en la elaboración de este proyecto. A la empresa EMAB por brindarnos la disposición del lugar. Finalmente, a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos las herramientas académicas para convertirnos en profesionales.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1 Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2 Generalidades.....	15
2.1 Relleno sanitario El Carrasco.....	15
2.2 Cárcava 1	15
2.3 Zona de estudio	16
3 Marco Teórico.....	18
3.1 Composición de un relleno sanitario.....	18
3.2 Mecanismos de asentamiento	20
3.2.1 Compresión primaria o mecánica	20
3.2.2 Biodegradación	20
3.2.3 Compresión por flujo plástico.....	21
3.2.4 Fenómenos físico-químicos	21
3.2.5 Interacción.....	21
3.2.6 Consolidación	21
3.3 Etapas de asentamientos	22
3.4 Programa GID.....	23
4 Metodología.....	24
4.1 Diseño de pruebas de campo.....	24

4.1.1 Construcción de sobrecarga	24
4.1.2 Ubicación de puntos de medición y de georreferencia	24
4.1.3 Análisis de las aplicaciones previas de sobrecarga y medición de asentamientos	25
4.1.4 Construcción del modelo en 2D y 3D.....	26
5 Análisis de Resultados	32
5.1 Resultados Modelo 2D.....	32
5.1.1 Línea Asentamientos observados en campo para el eje 1 y eje 2 de análisis	32
5.1.2 Calibración de Datos de campo mediante modelación numérica para eje 1 y 2 de análisis	33
5.1.3 Evaluación de la Porosidad del eje 1 y 2 de análisis en los modelos 2D.....	35
5.1.4 Evolución de la presión de Agua	37
5.2 Resultados Modelo 3D.....	38
5.2.1 Calibración de Datos de campo mediante modelación numérica para los ejes 1 y 2 de análisis.....	38
5.2.2 Distribución espacial de los desplazamientos verticales	39
5.2.3 Distribución espacial de la presión de agua.....	41
5.2.4 Desplazamiento de Modelo Predictivo de carga de un Panel Solar.....	43
6 Conclusiones	45
Referencias bibliográficas.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Coordenadas de los puntos	24
Tabla 2 Espesores de cada capa y propiedades del suelo	26

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Imagen satelital celda 1, relleno sanitario El Carrasco.....	17
Figura 2. Alineamiento del estudio geofísico	17
Figura 3. Composición general de los rellenos sanitarios.....	18
Figura 4. Caracterización de residuos sólidos en Bucaramanga.....	19
Figura 5. Caracterización de residuos sólidos orgánicos en Bucaramanga	20
Figura 6. Etapas de asentamientos en el tiempo	22
Figura 7. Equipos de trabajo	25
Figura 8. Geometría 2D	27
Figura 9. Geometría 3D	27
Figura 10. Ejemplo Modelo 3D del eje 1 de análisis Materiales asignados a cada tipo de suelo	28
Figura 11. Ejemplo Modelo 3D del eje 1 de análisis, Parámetro Elástico.....	28
Figura 12. Ejemplo Modelo 3D del eje 1 de análisis, Parámetro Hidráulicos.....	28
Figura 13. Ejemplo de la definición de un intervalo de tiempo de análisis.....	29
Figura 14. Ejemplo de la definición de las condiciones de frontera en el Modelo 3D.....	29
Figura 15. Ejemplo asignación de las restricciones de desplazamiento a las superficies del Modelo 3D.....	30
Figura 16. Ejemplo asignación de la Porosidad a los volúmenes del Modelo 3D.....	30
Figura 17. Ejemplo Malla (mesh) 3D	31
Figura 18. Asentamientos totales medidos del eje 1 de análisis	32
Figura 19. Asentamientos totales medidos del eje 2 de análisis	33
Figura 20. Datos de campo vs Modelación numérica del eje 1 de análisis	34

Figura 21. Datos de campo vs Modelación numérica del eje 2 de análisis	34
Figura 22. Evolución del coeficiente elásticos de los ejes 1 y 2 de análisis	35
Figura 23. Evolución del coeficiente viscoelásticos de los ejes 1 y 2 de análisis.....	35
Figura 24. Ejemplo de porosidad tiempo 0 minutos del eje 1 de análisis.....	36
Figura 25. Ejemplo de porosidad tiempo 33217.8 minutos del eje 1 de análisis.....	36
Figura 26. Ejemplo de porosidad tiempo 493919 minutos del eje 1 de análisis.....	36
Figura 27. Grafica de porosidad de los ejes 1 y 2 de análisis	37
Figura 28. Ejemplo variación de la presión de agua en el eje 1 de análisis.....	37
Figura 29. Datos de campo vs modelación numérica del eje 1 de análisis	38
Figura 30. Datos de campo vs modelación numérica del eje 2 de análisis	38
Figura 31. Evolución del coeficiente elástico de los ejes 1 y 2 de análisis.....	39
Figura 32. Evolución del coeficiente viscoelástico de los ejes 1 y 2 de análisis	39
Figura 33. Distribución de desplazamientos verticales en el área de carga del eje 1 de análisis	40
Figura 34. Acercamiento distribución de desplazamientos verticales en el área de carga del eje 1 de análisis.....	40
Figura 35. Distribución de desplazamientos verticales en el área de carga del eje 2 de análisis	40
Figura 36. Acercamiento distribución de desplazamientos verticales en el área de carga del eje 2 de análisis.....	41
Figura 37. Ejemplo distribución de la presión de agua en tiempo 0 minutos en el eje 2 de análisis.....	41
Figura 38. Ejemplo distribución de la presión de agua en tiempo 47620.6 minutos en el eje 2 de análisis.....	42

Figura 39. Ejemplo distribución de la presión de agua en tiempo 493966 minutos en el eje 2 de análisis.....	42
Figura 40. Ejemplo variación de la presión de agua en el eje 2 de análisis.....	43
Figura 41. Distribución de desplazamientos verticales del modelo predictivo en el tiempo 0 minutos para el eje 1 de análisis	43
Figura 42. Distribución de desplazamientos verticales del modelo predictivo en el tiempo de 10 años para el eje 1 de análisis.....	44
Figura 43. Distribución de desplazamientos verticales del modelo predictivo en el tiempo 0 minutos para el eje 2 de análisis	44
Figura 44. Distribución de desplazamientos verticales del modelo predictivo en el tiempo de 10 años para el eje 2 de análisis.....	44

Resumen

Título: Evaluación de asentamientos diferidos en el tiempo en el relleno sanitario el carrasco de la ciudad de Bucaramanga*

Autores: Erika Nathalia Galvis Carvajalino y Ivan Leonardo Santisteban Velasco**.

Palabras clave: Asentamiento, Relleno Sanitario, Modelos 2D y 3D.

Descripción: El presente proyecto de grado da continuidad al análisis de asentamientos en el relleno sanitario el carrasco de Bucaramanga, en la celda 1 ubicada en la cárcava 1, mediante la toma de datos en campo a partir de dos pruebas de carga y la simulación del fenómeno, cabe resaltar que se contaba con un modelo previo en 2D realizado en la tesis de grado de leal y becerra (2023) el cual se complementó y comparo con los datos obtenidos en las mediciones realizadas en el presente proyecto de grado, además de la creación del primer modelo 3D para el estudio de los asentamientos en el carrasco; cabe resaltar que los parámetros de elasticidad y viscoelasticidad, fueron ajustados iterativamente hasta alcanzar una tendencia aproximada con las observaciones de campo. los resultados obtenidos permitirán analizar escenarios de comportamiento hidromecánico para diferentes condiciones de carga, por ejemplo, en la planeación de un parque solar, prediciendo asentamientos en una ventana de tiempo de servicio.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán. Doctor en Ingeniería. Codirector: Álvaro Viviescas Jaimes. Doctor de Estructuras.

Abstract

Title: Evaluation of deferred settlements over time in the El Carrasco landfill in the city of Bucaramanga*

Authors: Erika Nathalia Galvis Carvajalino y Ivan Leonardo Santisteban Velasco**

Key Words: Settlement, Landfill, Models 2D and 3D.

Description: This degree project gives continuity to the analysis of settlements in the El Carrasco landfill of Bucaramanga, in cell 1 located in cárcava 1, by taking data in the field from two load tests and simulating the phenomenon, it should be noted that there was a previous 2D model in the Leal and Becerra degree thesis (2023) which was complemented and compared with the data obtained from the measurements carried out in this grade project, In addition to the creation of the first 3D model for the study of settlements in El Carrasco; it should be noted that the elasticity and viscoelasticity parameters were adjusted iteratively until a rough trend was achieved with field observations. The results obtained will allow to analyze hydromechanical behavior scenarios for different load conditions, for example in the planning of a solar park, predicting settlements in a service time window.

* Degree Work

**Faculty of Physicomechanical Engineering. Civil Engineering School. Director: Vladimir Ernesto Merchán. PhD in Engineering. Co-director: Álvaro Viviescas Jaimes. PhD in Structures.

Introducción

El crecimiento de la demanda energética a nivel global, ha provocado la búsqueda de nuevos espacios que permitan su producción de manera sustentable, sostenible y amigable con el medio ambiente; pero el aumento de la población humana ha minimizado los espacios disponibles, por consiguiente la Ingeniería Civil con el estudio de los asentamientos, presenta la posibilidad de aprovechar las áreas de los rellenos sanitarios clausurados, con la finalidad de construir sobre estas grandes extensiones de suelo que se consideran perdidas (Vega et al., 2023).

En el rellano sanitario El Carrasco de la ciudad de Bucaramanga, Santander se plantea la posibilidad de aprovechar este espacio, con el diseño e instalación de un parque de energía solar, pero para ello se deben estudiar los asentamientos por medio del modelamiento en GID en 2D y 3D, puesto que se requiere de analizar la estabilidad del suelo desde un punto de vista geotécnico con la finalidad de validar o viabilizar dicha posibilidad, dado que los rellenos sanitarios presentan complejidad debido a la heterogeneidad de los desechos, las propiedades variables en el tiempo de los desechos y los factores que influyen en los rellenos sanitarios (Farzaneh & Khabbaz, 2020).

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, este proyecto tiene como finalidad realizar mediciones complementarias en campo de los asentamientos en el relleno sanitario El Carrasco. Adicionalmente, se pretende realizar el ajuste de los valores de desplazamiento vertical con los modelos constitutivos previamente analizados y al menos dos aproximaciones adicionales dentro de un marco de referencia geométrico 3D para mejorar la estimación del campo de esfuerzos (Leal & Becerra, 2023). Finalmente, se realizarán simulaciones predictivas de los desplazamientos para la condición de carga de los paneles solares en una ventana de tiempo de 20 años, se usarán los

modelos existentes para este tipo de depósitos, y con esto poder realizar el ajuste de un modelo 2D a un modelo 3D.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Ajustar un modelo para la predicción de asentamientos diferidos en el tiempo para el relleno sanitario “El Carrasco”.

1.2 Objetivos Específicos

Medir los desplazamientos en los puntos de carga establecidos en las dos pruebas de campo.

Seleccionar, a partir de la literatura científica, al menos dos modelos constitutivos complementarios representativos del fenómeno analizado.

Calibrar las mediciones de campo con base en simulaciones numéricas 3D y los modelos constitutivos seleccionados.

Estimar escenarios predictivos de asentamientos para la condición de carga de un panel solar.

2 Generalidades

2.1 Relleno sanitario El Carrasco

El relleno sanitario El Carrasco se encuentra situado en el kilómetro 6 de la vía Girón, en el municipio de Bucaramanga. Con una extensión aproximada de 93 hectáreas, el sitio incluye tres cárcavas y cuatro celdas diseñadas para el manejo de residuos (Mora, 2019).

Además de las áreas dedicadas a la disposición de residuos, El Carrasco cuenta con una planta para el tratamiento de lixiviados, un parque contemplativo, y una estación destinada a la clasificación y valorización de los desechos (Alcaldía de Bucaramanga, 2022).

Este relleno sanitario recibe residuos de los municipios cercanos, como Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Rionegro, Playón y Matanza.

Sin embargo, debido a resoluciones judiciales que han ordenado su cierre, se han restringido las intervenciones y las inversiones en el sitio a corto plazo (Alcaldía de Bucaramanga, 2022).

2.2 Cárcava 1

Después de que la Cárcava 2, un vertedero a cielo abierto sin ninguna regulación técnica para la disposición de residuos sólidos fuera clausurada, se inició en 1985 la operación de una nueva área llamada Cárcava 1. Esta nueva zona buscaba mejorar el control sobre los residuos sólidos. La Cárcava 1 estaba compuesta por las celdas 1 y 2, donde se depositaron aproximadamente 1.300.000 toneladas de residuos provenientes de 15 municipios en una extensión de 17 hectáreas. Sin embargo, el 10 de noviembre de 2010, mediante la Resolución 1328, la CDMB ordenó el cierre definitivo de esta celda transitoria, efectivo a partir del 16 de marzo de 2011. A

pesar de esta disposición, entre 2011 y 2016 se reanudó el uso de la cárcava (Díaz & Peñarada, 2021; Torrado & Rondón, (n.d.)).

2.3 Zona de estudio

La zona analizada corresponde a la antigua Celda 1, situada en la Cárcava 1 del relleno sanitario El Carrasco. En este sitio, se depositaban diariamente capas de residuos de 0,5 metros de altura, organizadas en forma escalonada mediante la formación de terrazas y celdas. En el año 2011, mediante el Decreto 234, se declaró una emergencia sanitaria con el propósito de aprovechar la capacidad remanente de la celda adyacente a la actual área de disposición dentro de El Carrasco. Esta emergencia sanitaria fue prorrogada posteriormente en los años 2012 y 2013, a través de los Decretos 0056 y 190, respectivamente (Torrado & Rondón, n.d.). En 2015, la Alcaldía de Bucaramanga extendió la emergencia de calamidad pública por 24 meses mediante el Decreto 158. Esta extensión se centró en la prestación de los servicios de disposición final de residuos, particularmente en lo que respecta a las celdas 1, 2 y 4 de la Cárcava 1 (Autoridad Nacional De Licencias Ambientales, 2018).

La Celda 1, con una extensión de 2,2 hectáreas y una altura promedio de 5 metros, ya ha sido clausurada (Franco, Meza & Almeira, 2018). En la actualidad, el área de la celda está en proceso de revegetalización. El material de cobertura está compuesto por capas de 0,3 a 0,5 metros, que incluyen geomembranas y una capa superficial de material arcilloso con vegetación. Además, se han colocado bermas para evitar la emisión de gases tóxicos y proteger el relleno de la infiltración de agua (Díaz & Peñarada, 2021; Torrado & Rondón, (n.d.)).

En la Figura 1 se presenta una imagen satelital de la antigua Celda 1, ubicada en el relleno sanitario. Para el desarrollo específico de este proyecto, se enfocó en una pequeña área dentro de esta celda. En esta área se cuenta con información sobre un alineamiento que corresponde a un

estudio de geofísica. Los detalles adicionales sobre el alineamiento se ofrecerán en secciones posteriores de la metodología. La Figura 2 ilustra el alineamiento mencionado, sobre el cual se ha trabajado en el proyecto.

Figura 1.

Imagen satelital celda 1, relleno sanitario El Carrasco



Nota. Imagen satelital. Tomado de *Google Earth (2024)*.

Figura 2.

Alineamiento del estudio geofísico



Nota. Imagen satelital. Tomado de *Google Earth (2024)*.

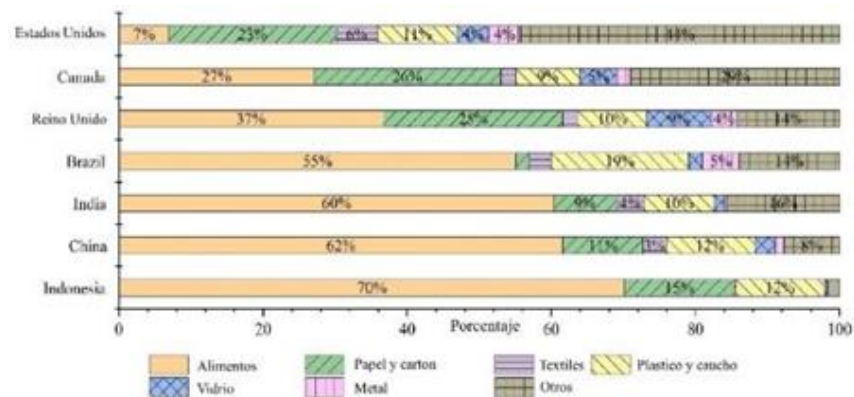
3 Marco Teórico

3.1 Composición de un relleno sanitario

La composición de un relleno sanitario puede ser bastante diversa e incluir una amplia gama de materiales, tales como desechos de jardín, alimentos, metales, productos de papel, caucho, cuero, textiles, vidrio, plástico y madera, entre otros. La proporción de estos desechos varía según la región. Por ejemplo, en los países en vías de desarrollo, se observa una tendencia a tener mayores cantidades de residuos orgánicos y menos desechos reciclables (Ren, Zhang & Huang, 2022). La Figura 3 muestra la composición de los residuos sólidos y las variaciones en esta composición para algunos países de referencia.

Figura 3.

Composición general de los rellenos sanitarios



Nota. Composición de rellenos sanitarios de algunos países. Adaptado de Ren, Zhang & Huang (2022).

Los rellenos sanitarios, al igual que los suelos, son materiales porosos compuestos por partículas y poseen un sistema de fases sólida, líquida y gaseosa. No obstante, los rellenos sanitarios presentan una complejidad mayor debido a la diversidad en las propiedades, formas y tamaños de las partículas, así como su distribución irregular. Esto resulta en un medio heterogéneo

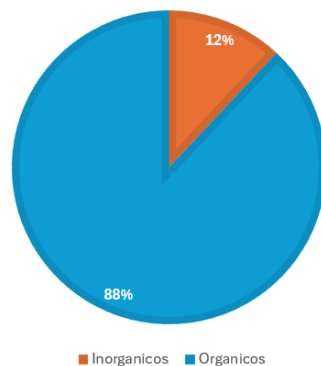
y anisotrópico, que está sometido a una variedad de fenómenos físicos y químicos, así como a procesos de biodegradación.

Estos procesos de biodegradación en los vertederos inducen transformaciones en los desechos sólidos, convirtiéndolos en fases líquidas y gaseosas. Como resultado, se generan lixiviados, gases y liberación de calor, además de provocar variaciones en el volumen del relleno. A lo largo de su vida útil, los vertederos experimentan una serie de cambios en su estructura debido a estos procesos, lo que conlleva un aumento en los volúmenes de los poros y altera los esfuerzos efectivos en el esqueleto sólido del relleno. Estas alteraciones, a su vez, afectan las deformaciones del relleno sanitario (Ren, Zhang & Huang, 2022).

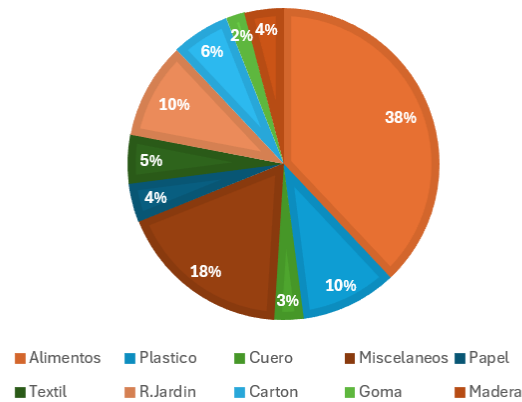
En el área metropolitana de Bucaramanga, aproximadamente el 88% de los residuos sólidos están compuestos por materiales orgánicos. Dentro de esta categoría, los residuos alimentarios y misceláneos dominan, representando el 38% y el 18% del total de los residuos orgánicos, respectivamente. Las Figuras 4 y 5 ilustran las proporciones de estos residuos, proporcionando una visión clara de su distribución en la composición total de los desechos.

Figura 4.

Caracterización de residuos sólidos en Bucaramanga



Nota. Adaptado de EMAB (2016).

Figura 5.*Caracterización de residuos sólidos orgánicos en Bucaramanga*

Nota. Adaptado de EMAB (2016).

3.2 Mecanismos de asentamiento

3.2.1 Compresión primaria o mecánica

El mecanismo de compresión, también conocido como asentamientos primarios, se produce debido a la reorientación y el movimiento de las partículas, así como al colapso de los espacios vacíos generado por el peso propio de los desechos (Sivakumar et al., 2010). Este proceso de compresión generalmente comienza poco después de que se completa el llenado, con una variación que puede oscilar entre diez y noventa días. La duración de este proceso depende de varios factores, incluyendo el tipo de desechos, la geometría del llenado, la densidad del relleno y el método de operación utilizado (Rivera, 2012).

3.2.2 Biodegradación

Este proceso es el resultado de la degradación del material por bacterias mediante mecanismos tanto aeróbicos como anaeróbicos. En particular, la descomposición de la celulosa en ausencia de oxígeno es el principal responsable de este tipo de degradación. Durante este proceso,

las bacterias transforman los materiales sólidos, que están compuestos en su mayoría por carbono y agua, en dióxido de carbono y metano (Rivera, 2012).

3.2.3 Compresión por flujo plástico

Este mecanismo se origina a partir de varias causas. Primero, la erosión y el transporte de partículas finas hacia los vacíos entre las partículas grandes contribuyen a este fenómeno. En segundo lugar, la biodegradación genera partículas finas que llenan estos vacíos. Finalmente, los procesos que ocurren después de la compresión elástica también juegan un papel importante. El debilitamiento de la capacidad de soporte del material de relleno ocurre parcialmente debido al llenado de los vacíos, un proceso que es impulsado por fenómenos como la corrosión y la biodegradación (Rivera, 2012).

3.2.4 Fenómenos físico-químicos

La degradación de productos orgánicos, junto con la corrosión, oxidación y degradación de materiales inorgánicos, da lugar a este tipo de mecanismo de asentamiento (Rivera, 2012).

3.2.5 Interacción

Este mecanismo depende de la presencia de oxígeno y de otros procesos de asentamiento, ya que por sí solo no causa asentamientos significativos. No obstante, puede contribuir a asentamientos localizados en áreas específicas. En este proceso, la interacción entre el metano y la combustión, junto con los ácidos orgánicos y la combustión espontánea, genera corrosión (Rivera, 2012).

3.2.6 Consolidación

El asentamiento por consolidación se produce debido a la salida de líquido del suelo. Cuando se incrementa la presión de poros, una parte del líquido presente en el suelo se expulsa, lo que resulta en una reducción del volumen y una densificación del relleno (Rivera, 2012).

3.3 Etapas de asentamientos

Los asentamientos en los rellenos sanitarios se desarrollan en cinco etapas a lo largo del tiempo, como se ilustra en la Figura 6. Estas etapas se describen a continuación:

1. Asentamiento inicial: Este tipo de asentamiento suele ser causado por la compresión física, que puede ser el resultado de la aplicación de una carga externa o de un reajuste inicial de las partículas. Durante esta fase, se produce una reducción de los vacíos dentro del relleno debido al peso propio (Yepes & Villarraga, 2018).

2. Asentamiento primario: En esta etapa, se observa un asentamiento no uniforme, ya que las partículas más pequeñas tienden a llenar los vacíos entre las partículas más grandes (Rivera, 2012).

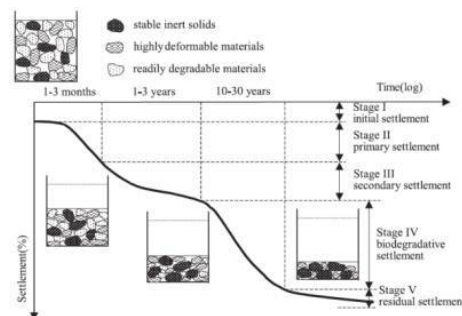
3. Asentamiento secundario: Este asentamiento, también conocido como asentamiento tipo "creep", ocurre debido a la presencia de cargas constantes sobre el relleno (Yepes, 2015).

4. Asentamiento por biodegradación: Se refiere al asentamiento generado por la descomposición de los componentes orgánicos presentes en el relleno (Rivera, 2012).

5. Asentamiento residual: Esta etapa es el resultado de procesos físico-químicos, tales como la degradación de componentes inorgánicos, la corrosión y la oxidación (Rivera, 2012).

Figura 6.

Etapas de asentamientos en el tiempo



Nota. Tomado de Rivera (2012).

3.4 Programa GID

El programa está diseñado para manejar la interfaz gráfica de simulaciones numéricas para un pre o pos-procesamiento, con aplicaciones en análisis estructural, mecánico, dinámica de fluidos, transferencia de calor y problemas geotécnicos, entre otros; utilizando datos primordiales como definición de la geometría, materiales y condiciones; el programa GID (Ribo et al., 2018), utiliza el programa CODE BRIGHT (CODE_BRIGHT, 2024) como herramienta para manejar los problemas de acoplamiento.

4 Metodología

4.1 Diseño de pruebas de campo

4.1.1 Construcción de sobrecarga

Las placas de concreto (Figura 7) utilizadas en el proceso de carga son las mismas que se desarrollaron en la tesis de grado de Leal y Becerra (2023). Este proyecto de grado da continuidad a la investigación previamente realizada en el relleno sanitario El Carrasco.

4.1.2 Ubicación de puntos de medición y de georreferencia

Con base en la metodología planteada en la investigación que se ha adelantado en el relleno sanitario El Carrasco (Tabla. 1), se definieron dos ejes de carga asociados a los puntos “1 y 2”, además del punto de referencia el cual se georreferencio en un punto que no presentara asentamientos y estuviera fuera del relleno sanitario El Carrasco; los ejes 1 y 2 se analizaron mediante la propagación de ondas P y S con base en la menor rigidez y mayor asentamiento, para obtener así la aproximación de las propiedades mecánicas del suelo en estado inicial del intervalo de carga de cada eje.

Tabla 1

Coordenadas de los puntos

Coordenadas en Magna Sirgas 3116		
Punto	N	E
Georreferencia	1274600.675	1103044.689
Eje 1	1274627.1551	1103215.3564
Eje 2	1274635.5608	1103203.2359

Nota. Tomado de *Leal & Becerra (2023)*.

4.1.3 Análisis de las aplicaciones previas de sobrecarga y medición de asentamientos

Se instaló la mira topográfica y el teodolito bajo parámetros de calidad con su respectiva nivelación y buen posicionamiento en campo (Figura. 7), seguido de la toma de referencia de la mira, con la finalidad de iniciar la medición de los ejes 1 y 2 de análisis instaladas en la tesis de grado de Leal y Becerra (2023).

Por medio de la implementación del teodolito se buscó analizar el comportamiento del asentamiento con los ejes 1 y 2 de análisis instaladas por Leal y Becerra (2023) sin ser alteradas, todo esto para analizar su comportamiento en un lapso de tiempo entre la instalación y medición de las sobre carga y el presente proyecto de grado.

Se les realizaron a los ejes “1 y 2” de análisis, cuatro mediciones por visita al relleno sanitario, cada una con un tiempo de espera entre mediciones de 60 min durante seis meses.

Figura 7.

Equipos de trabajo



4.1.4 Construcción del modelo en 2D y 3D

Se exportaron a Excel los datos de campo obtenidos en las mediciones realizadas a los ejes “1 y 2” de análisis, por medio de una Micro SD conectada al teodolito, obteniendo así la graficar de la línea de campo.

El programa Code Bright trabaja jerárquicamente para construir la geometría de un modelo numérico: parte de la definición de nodos, líneas, superficies y volúmenes. En el caso de los modelos 2D y 3D de los ejes “1 y 2” de análisis, en los dos modelos se deben de realizar las superficies de cada sólido, con la única diferencia que para el modelo 3D se realizaron los volúmenes, teniendo en cuenta los espesores de cada capa, tomados del estudio geofísico realizado en la Tesis de Maestría de Álvarez (2023), mostrados en la tabla 2. Se presentan también los valores de módulo elástico interpretados a partir de esta prueba geofísica, pero se toman como datos de referencia teniendo en cuenta que son válidos para muy pequeñas deformaciones y por tanto deben ajustarse iterativamente para los niveles de deformación en ingeniería.

Tabla 2

Espesores de cada capa y propiedades del suelo

Capa	Espesores		E [Mpa]	Porosidad	
	Eje 1 [m]	Eje 2 [m]		2D	3D
1	0.503	0.503	37.117	0.600	0.300
2	0.410	0.624	37.464	0.520	0.300
3	1.000	1.278	37.842	0.450	0.300
4	1.000	2.223	36.308	0.400	0.300
5	4.000	2.500	37.925	0.350	0.300
6	3.500	3.500	44.721	0.300	0.300

Posteriormente, se realizó la creación de la geometría de los modelos 2D y 3D, de acuerdo con sus especificaciones, mostrados así en la figura 8 y 9 respectivamente. En el caso del modelo 3D, se aprovecha la condición de simetría del eje central de manera que se simuló una cuarta parte del área cargada.

Figura 8.

Geometría 2D

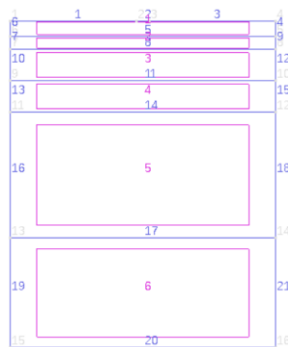
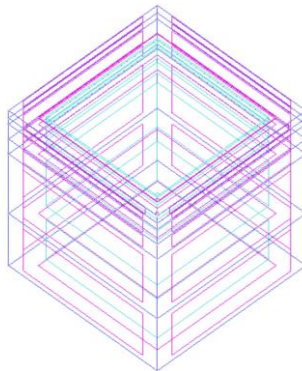


Figura 9.

Geometría 3D



Posteriormente se agregaron los materiales correspondientes a seis sólidos (figura 10), considerando las variables del modelo constitutivo, tomamos en cuenta tanto un modelo elástico y un modelo viscoelástico ; por otra parte, como la modelación es hidromecánica acoplada, es necesario contar con datos de entrada asociados al comportamiento hidráulico, entre ellos la permeabilidad intrínseca y permeabilidad relativa de la fase líquida, mostrados en las figuras 11 y

12. Para estos datos del componente hidráulico se tomaron datos de referencia para este tipo de materiales.

Figura 10.

Ejemplo Modelo 3D del eje 1 de análisis Materiales asignados a cada tipo de suelo

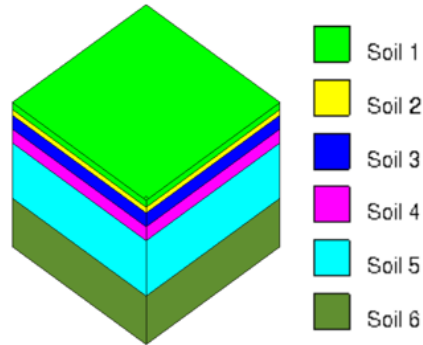


Figura 11.

Ejemplo Modelo 3D del eje 1 de análisis, Parámetro Elástico

Soil 1						
Mechanical data 1	Mechanical data 2	Mechanical data 3	Mechanical data 4	Hydraulic		
Linear Elasticity 1	ITYCL	P1	P2	P3	P4	
Linear Elasticity 2	1	100	0	0.25	0	
Nonlinear Elasticity	1	100	0	0.4	0	
Viscoelasticity - creep	1	2000	0	0.4	0	
Viscoplasticity - creep	1	100	0	0.4	0	
VPSSR	1	100	0	0.4	0	
VPUSR 1	1	1.666	0	0.4	0	
VPUSR 2	1	1.544	0	0.4	0	
VPUSR 3	1	0.928	0	0.4	0	
	1	2.049	0	0.4	0	
	1	0.007	0	0.4	0	
	1	0.148	0	0.4	0	
	1	5000	0	0.4	0	

Figura 12.

Ejemplo Modelo 3D del eje 1 de análisis, Parámetro Hidráulicos

Soil 1							
Mechanical data 1	Mechanical data 2	Mechanical data 3	Mechanical data 4	Hydraulic and thermal data		Phase properties	
Retention Curve	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Retention Curve 2	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Intrinsic Permeability	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Liquid Phase Relative Permeability	1	1e-10	1e-10	1e-10	0	0	0
Gas Phase Relative Permeability	1	1e-14	1e-14	1e-14	0.6	0.2	0
Diffusive Flux of Vapour	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6

Para implementar los intervalos de tiempo (Figura 13), es importante considerar los diferentes parámetros que se deben incluir, como el equilibrio geoestático, la fase de carga y el análisis de asentamientos diferidos a lo largo del tiempo. Además, cada intervalo de tiempo presenta condiciones específicas (Figura 14), que incluyen las condiciones de contorno, condiciones de flujo (Figura 15), las cargas correspondientes y la porosidad aplicada en cada capa (Figura 16).

Figura 13.

Ejemplo de la definición de un intervalo de tiempo de análisis

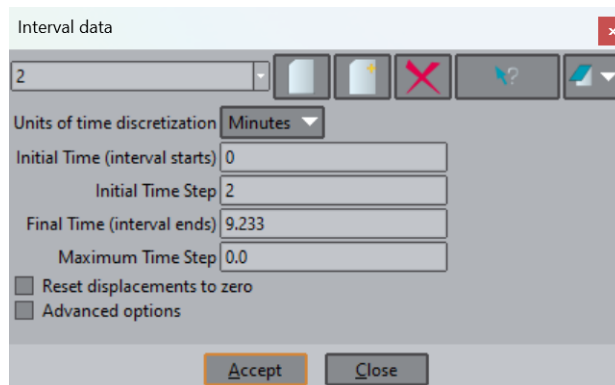


Figura 14.

Ejemplo de la definición de las condiciones de frontera en el Modelo 3D

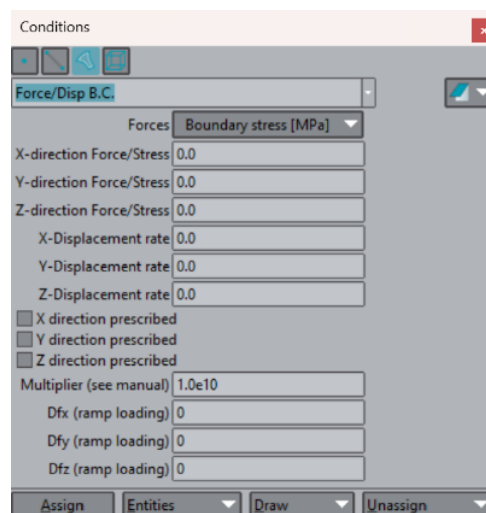
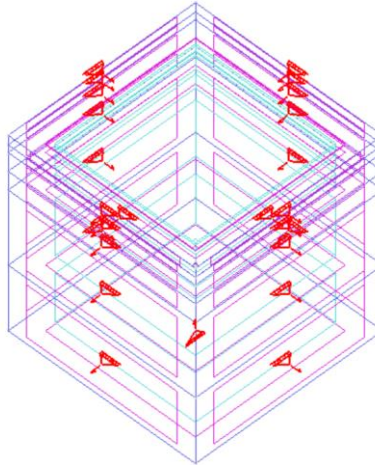
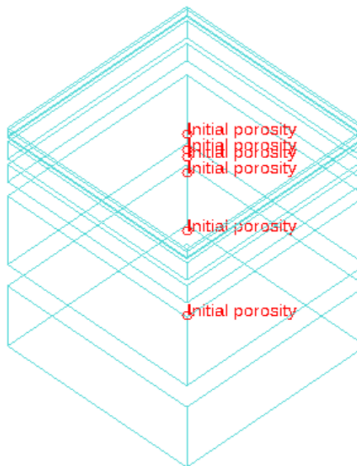


Figura 15.

Ejemplo asignación de las restricciones de desplazamiento a las superficies del Modelo 3D

**Figura 16.**

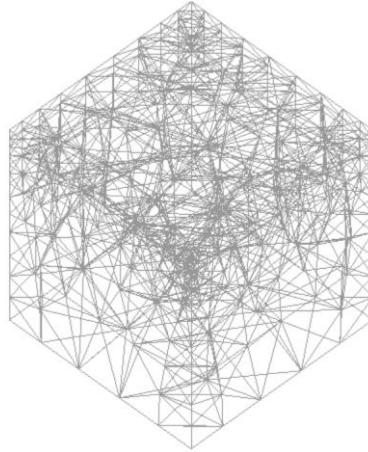
Ejemplo asignación de la Porosidad a los volúmenes del Modelo 3D



En el programa, se genera un mallado (mesh) con el objetivo de dividir el dominio de estudio en elementos finitos, como triángulos o cuadriláteros en modelos 2D, y tetraedros o hexaedros en modelos 3D (figura 17). Esta discretización permite realizar cálculos de manera más precisa, lo que a su vez facilita obtener los resultados.

Figura 17.

Ejemplo Malla (mesh) 3D



5 Análisis de Resultados

El proceso para llegar a los resultados partió de un modelo 2D elaborado en la tesis de grado de Leal y Becerra (2023), al cual se le adicionaron los datos obtenidos en campo del presente trabajo de grado, además se creó un modelo 3D, con el fin de analizar el comportamiento de los asentamientos originados en el relleno sanitario El Carrasco con el pasar del tiempo.

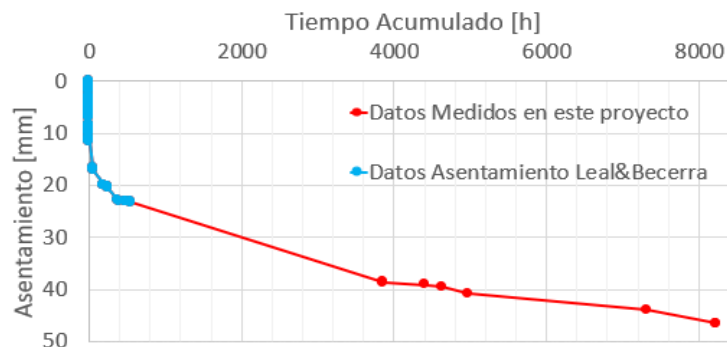
5.1 Resultados Modelo 2D

5.1.1 Línea Asentamientos observados en campo para el eje 1 y eje 2 de análisis

Con los datos obtenidos en campo y los proporcionados por la tesis de grado de Leal y Becerra (2023), se determinó que el asentamiento para el eje 1 de análisis, aumento del valor final tomado por Leal y Becerra (2023) (23,22 mm), puesto que luego de cuatro meses al inicio del presente proyecto de grado el asentamiento midió 38,8 mm y luego de siete meses de mediciones finalizo en 46,53 mm (Figura 18), representando un aumento de 23,30 mm o del 100,39% en un periodo de tiempo total de once meses.

Figura 18.

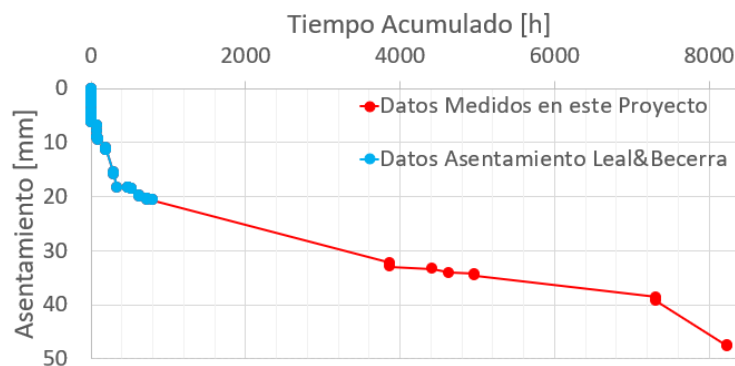
Asentamientos totales medidos del eje 1 de análisis



Con los datos obtenidos en campo y los proporcionados por la tesis de grado de Leal y Becerra (2023), se determinó que el asentamiento para la Carga 2, aumento del valor final tomado por Leal y Becerra (2023) (20,59 mm), puesto que luego de cuatro meses al inicio del presente proyecto de grado el asentamiento midió 32,16 mm y luego de siete meses de mediciones finalizó en 47,73 mm (Figura 19), representando un aumento de 27,14 mm o del 131,81% en un periodo de tiempo total de once meses.

Figura 19.

Asentamientos totales medidos del eje 2 de análisis



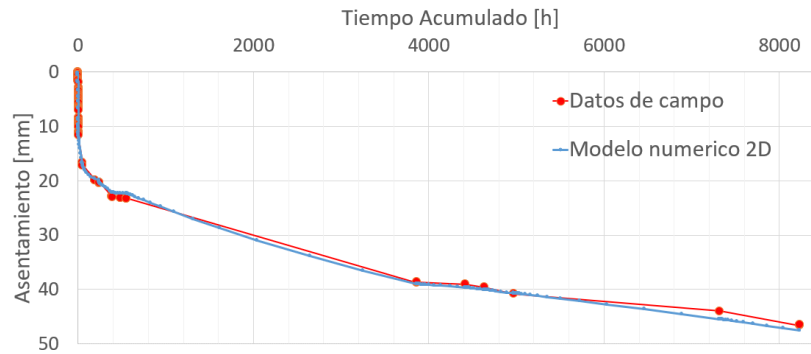
5.1.2 Calibración de Datos de campo mediante modelación numérica para eje 1 y 2 de análisis

A continuación, se presenta la calibración por análisis iterativo de prueba y error, probando los diferentes valores de las propiedades para los resultados de los asentamientos de campo, obteniendo así un modelo numérico para cada uno de los ejes 1 y 2 de análisis, con la finalidad de producir un modelo con mayor predicción y ajuste.

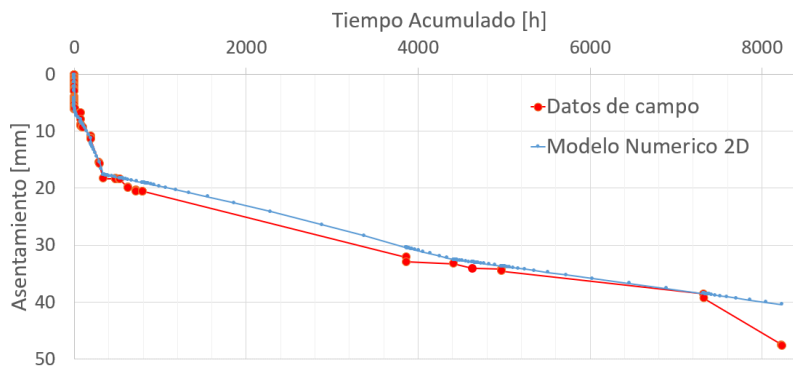
En las Figuras 20 y 21 se presentan la comparación de los datos de la Línea de campo con datos de la simulación por elementos finitos calibrados para los ejes 1 y 2 de análisis.

Figura 20.

Datos de campo vs Modelación numérica del eje 1 de análisis

**Figura 21.**

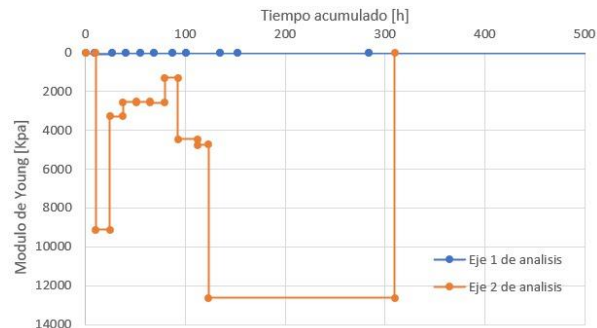
Datos de campo vs Modelación numérica del eje 2 de análisis



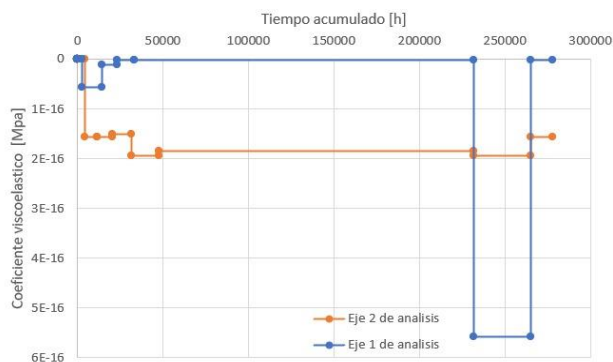
En la figura 22 se observa el comparativo del comportamiento elástico de los dos ejes de análisis. En la figura 23 se expone el comportamiento del coeficiente viscoelástico para los dos ejes de análisis teniendo en cuenta las variaciones que se realizaron en cada uno para lograr la calibración del modelo.

Figura 22.

Evolución del coeficiente elásticos de los ejes 1 y 2 de análisis

**Figura 23.**

Evolución del coeficiente viscoelásticos de los ejes 1 y 2 de análisis

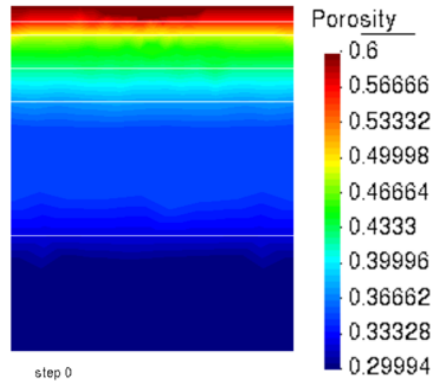


5.1.3 Evaluación de la Porosidad del eje 1 y 2 de análisis en los modelos 2D

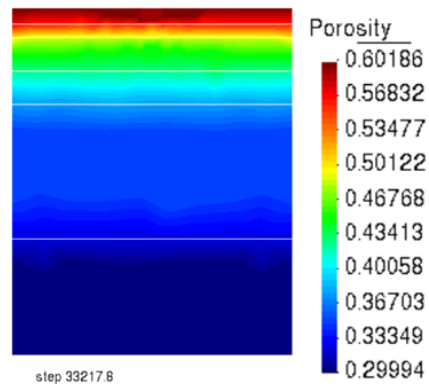
El análisis de la porosidad se realizó teniendo en cuenta la variación del tiempo desde el momento inicial y final (figura 24 y 25) de la tesis de grado de Leal y Becerra (2023), hasta el último dato obtenido en campo en el presente proyecto de grado (figura 26), todo esto para evaluar su comportamiento en los ejes 1 y 2 de análisis. De los resultados se puede apreciar que la mayor afectación de la porosidad se encuentra en la primera capa del relleno y en el primer tercio de la segunda. Lo cual es aproximadamente 3 veces el ancho de las placas cargadas.

Figura 24.

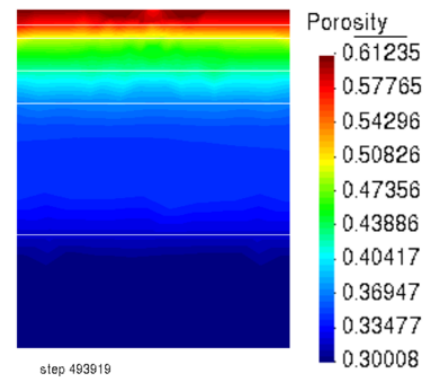
Ejemplo de porosidad tiempo 0 minutos del eje 1 de análisis

**Figura 25.**

Ejemplo de porosidad tiempo 33217.8 minutos del eje 1 de análisis

**Figura 26.**

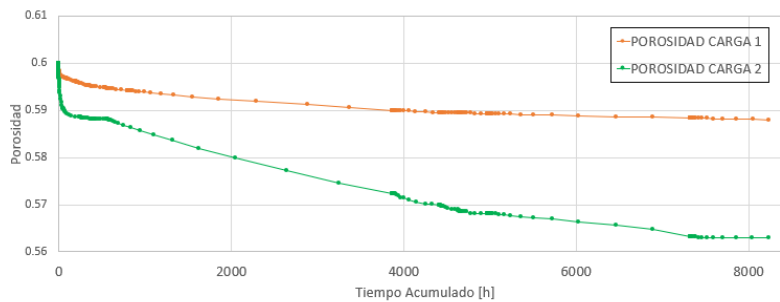
Ejemplo de porosidad tiempo 493919 minutos del eje 1 de análisis



Los valores de porosidad (Figura 27), presentaron disminuciones con el pasar del tiempo, lo cual se atribuye al fenómeno de compresión del terreno bajo una carga constante, influenciado por los efectos de viscosidad.

Figura 27.

Grafica de porosidad de los ejes 1 y 2 de análisis

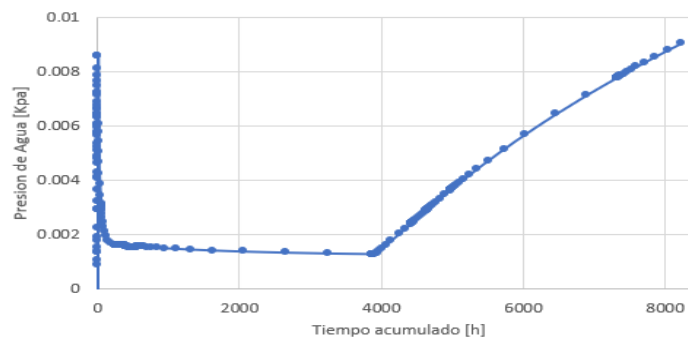


5.1.4 Evolución de la presión de Agua

En la figura 28 se muestra la evolución de la presión de agua a lo largo del tiempo. Se ilustra un ejemplo del eje 1 de análisis, donde se destaca un tiempo constante, pero posteriormente experimenta un aumento debido a las propiedades viscoelasticidad.

Figura 28.

Ejemplo variación de la presión de agua en el eje 1 de análisis



5.2 Resultados Modelo 3D

5.2.1 Calibración de Datos de campo mediante modelación numérica para los ejes 1 y 2 de análisis

En el modelo 3D se logró obtener la calibración de la línea experimental de igual manera que para el modelo 2D, con un análisis iterativo de prueba y error, y con los mismos valores para la línea de campo, pero se evidencio que los parámetros elasticidad y viscoelasticidad se debían de procesar en simultaneo, todo esto para obtener la mayor predicción y ajuste en el modelo 3D.

La calibración de la línea experimental para los ejes 1 y 2 de análisis del modelo 3D se presentan en las Figuras 29 y 30.

Figura 29.

Datos de campo vs modelación numérica del eje 1 de análisis

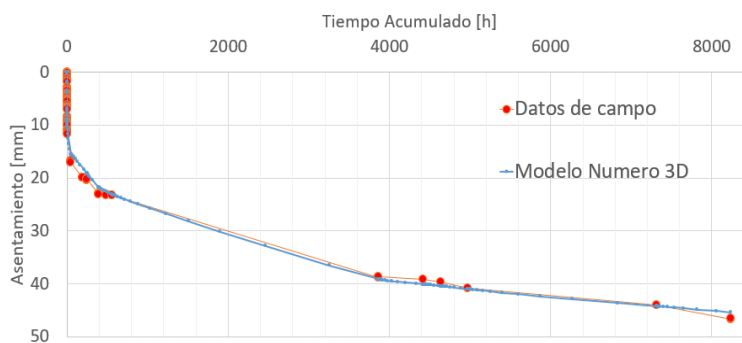
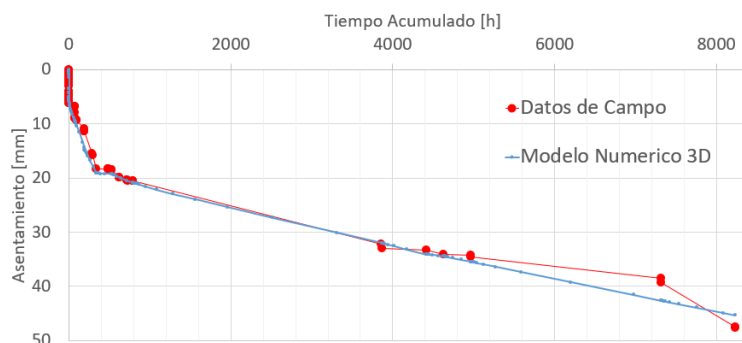


Figura 30.

Datos de campo vs modelación numérica del eje 2 de análisis



En la figura 31 se observa el comparativo del comportamiento elástico de los dos ejes de análisis. En la figura 32 se expone el comportamiento del coeficiente viscoelástico para los dos ejes de análisis teniendo en cuenta las variaciones que se realizaron en cada uno para lograr la calibración del modelo.

Figura 31.

Evolución del coeficiente elástico de los ejes 1 y 2 de análisis

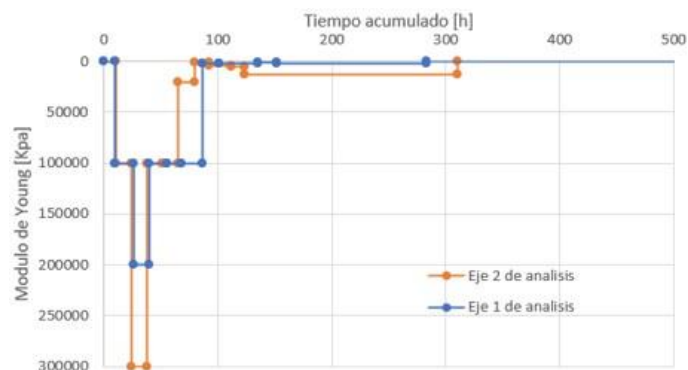
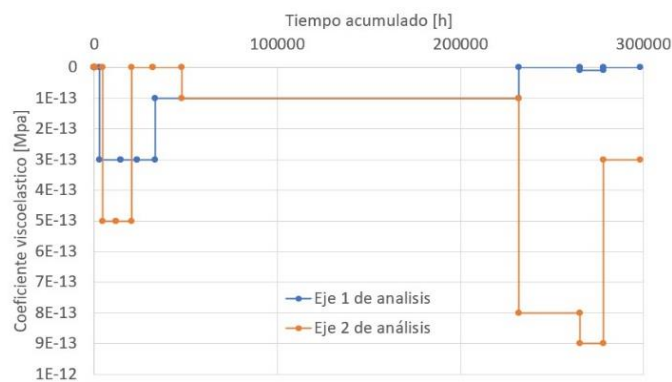


Figura 32.

Evolución del coeficiente viscoelástico de los ejes 1 y 2 de análisis



5.2.2 Distribución espacial de los desplazamientos verticales

En las figuras 33 y 34 se ilustran los comportamientos de desplazamiento vertical en el eje 1 de análisis al finalizar el período de medición, junto con la zona de carga correspondiente. A continuación, las figuras 35 y 36 muestran el mismo comportamiento, pero en el eje 2 de análisis.

Figura 33.

Distribución de desplazamientos verticales en el área de carga del eje 1 de análisis

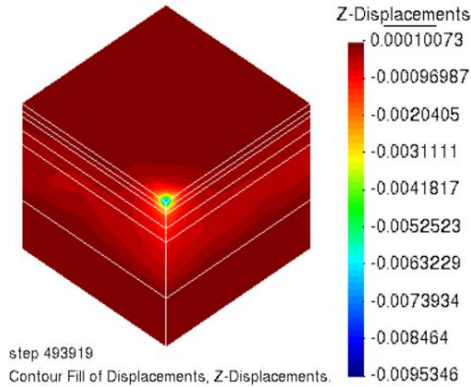


Figura 34.

Acercamiento distribución de desplazamientos verticales en el área de carga del eje 1 de análisis

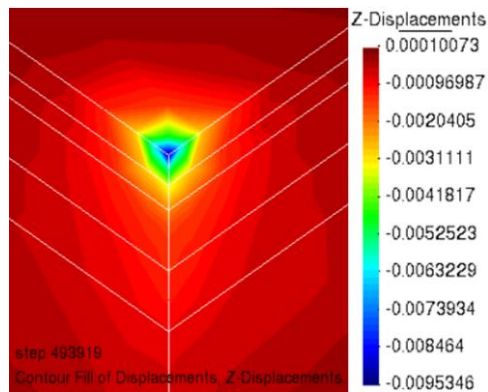


Figura 35.

Distribución de desplazamientos verticales en el área de carga del eje 2 de análisis

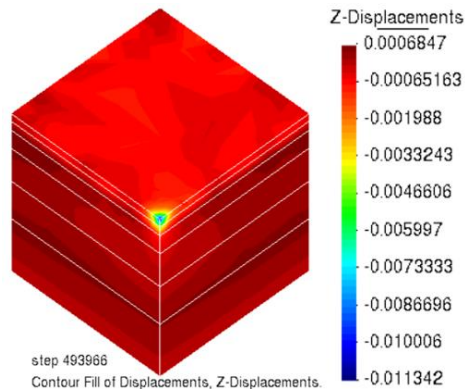
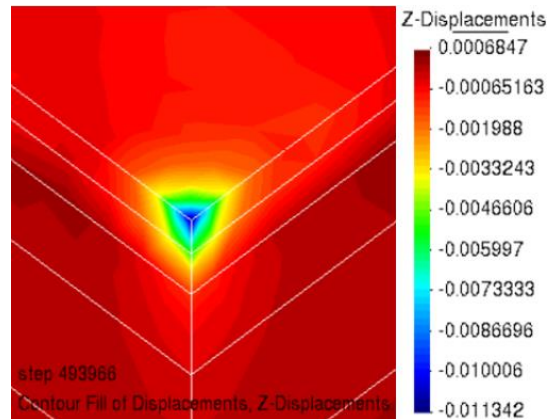


Figura 36.

Acercamiento distribución de desplazamientos verticales en el área de carga del eje 2 de análisis



5.2.3 Distribución espacial de la presión de agua

El análisis de la distribución espacial de la presión de agua se llevó a cabo en tres momentos diferentes: al tiempo cero (figura 37), al final de la carga del suelo (figura 38) y al concluir el análisis (figura 39). Este enfoque permite visualizar de manera más clara los cambios en la presión a lo largo del tiempo.

Figura 37.

Ejemplo distribución de la presión de agua en tiempo 0 minutos en el eje 2 de análisis

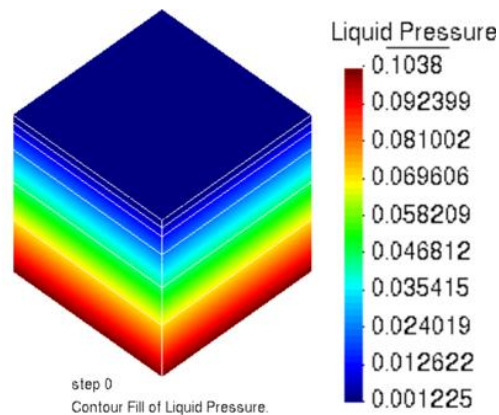
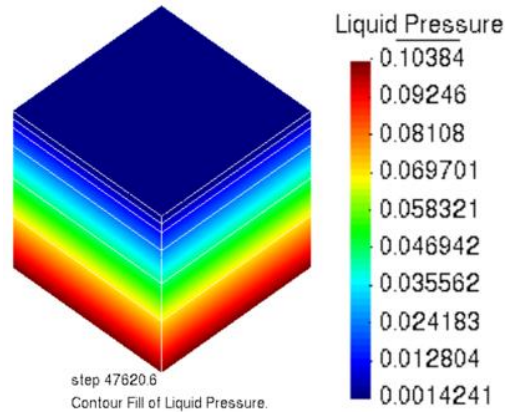
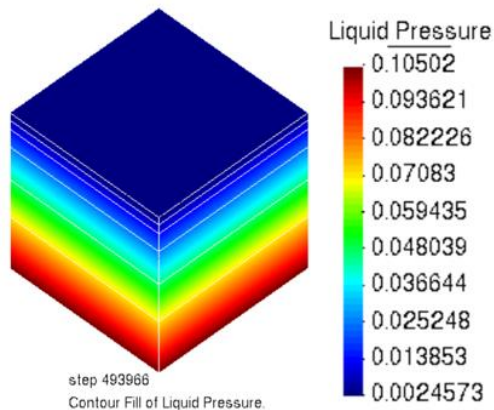


Figura 38.

Ejemplo distribución de la presión de agua en tiempo 47620.6 minutos en el eje 2 de análisis

**Figura 39.**

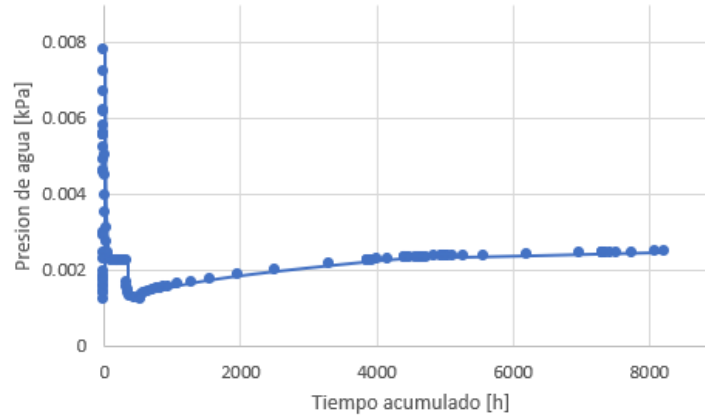
Ejemplo distribución de la presión de agua en tiempo 493966 minutos en el eje 2 de análisis



A continuación, se presenta un ejemplo del eje 2 de análisis (figura 40), que muestra una presión de agua constante con un ligero aumento.

Figura 40.

Ejemplo variación de la presión de agua en el eje 2 de análisis



5.2.4 Desplazamiento de Modelo Predictivo de carga de un Panel Solar

Se ilustra el comportamiento de desplazamiento para un modelo predictivo para el eje 1 (figura 41 y 42) y eje 2 (figura 43 y 44) de análisis en un tiempo inicial y finalizando luego de 10 años de vida útil del panel solar la cual se asumió una carga de 2.8 kPa en los dos ejes para generar una predicción debido al esfuerzo de contacto.

Figura 41.

Distribución de desplazamientos verticales del modelo predictivo en el tiempo 0 minutos para el eje 1 de análisis

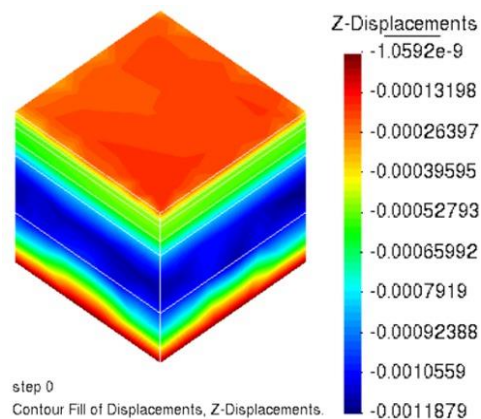


Figura 42.

Distribución de desplazamientos verticales del modelo predictivo en el tiempo de 10 años para el eje 1 de análisis

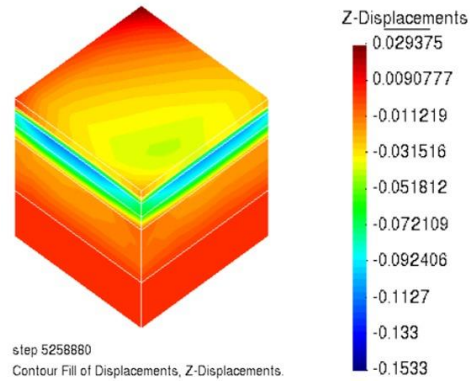


Figura 43.

Distribución de desplazamientos verticales del modelo predictivo en el tiempo 0 minutos para el eje 2 de análisis

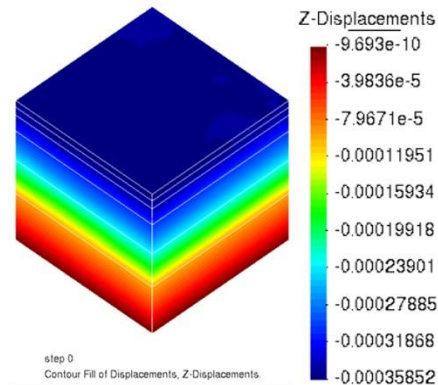
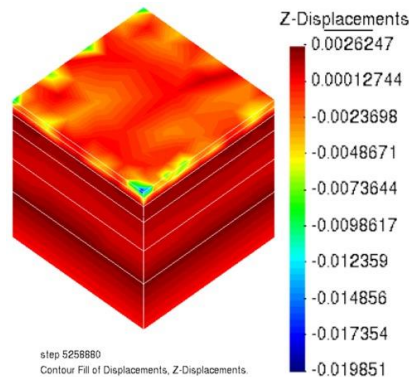


Figura 44.

Distribución de desplazamientos verticales del modelo predictivo en el tiempo de 10 años para el eje 2 de análisis



6 Conclusiones

En este trabajo de investigación se dio continuidad a un trabajo de campo en el cual se midieron asentamientos en dos ejes de carga de la zona 1 de la cárcava 1 del relleno sanitario El Carrasco. Esto permitió para el tiempo del proyecto evidenciar asentamientos diferidos en el tiempo hasta valores cercanos a los 50 mm en los ejes analizados. Con esto se dio cumplimiento al primer objetivo específico del proyecto de grado.

A partir de la literatura científica se seleccionaron los modelos constitutivos elástico lineal y viscoelástico, como modelos representativos y complementarios para explicar el fenómeno asentamientos inmediatos y en el tiempo. Como se observó en la evolución de la presión de agua en la fase de carga, el proceso es no drenado Solo en el primer intervalo de carga para luego disipar el incremento de presión de agua rápidamente. Por lo anterior, los resultados de la simulación sugieren que no hay un efecto de consolidación primaria explícito, sino un proceso drenado durante la fase de carga que se calibró con parámetros elásticos y luego de la fase de carga el modelo viscoelástico permitió con el proceso iterativo calibrar sus coeficientes para encontrar una respuesta adecuada en el tiempo para la evolución de los desplazamientos. Por tanto, se considera que se cumple a cabalidad el segundo objetivo específico y el tercero que correspondía a calibrar las mediciones en campo con el modelo 3D.

Una vez ajustados y complementados los modelos se realizaron dos simulaciones predictivas para el eje 1 y 2 respectivamente para una de las zapatas de un panel solar a lo largo de 10 años, en las simulaciones se encontró para el eje 1 un desplazamiento total de 15.33 cm par una ventana de tiempo de 10 años y para el eje 2 se encontró un desplazamiento total de 1.9851 cm. Estos valores son preliminares, pero permiten establecer un primer escenario de análisis dentro

del proyecto de investigación. Por otra parte, es importante anotar que la evolución de los desplazamientos en él es continua de acuerdo a lo sugerido por los resultados de las simulaciones.

Referencias bibliográficas

Alcaldía de Bucaramanga. (2022). *Así opera El Carrasco actualmente*. <https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/asi-opera-el-carrasco-actualmente/>

Álvarez, J. A. (2023). *Evaluación de las condiciones de estabilidad del terreno para la instalación de un parque solar fotovoltaico en una zona clausurada del relleno sanitario El Carrasco de Bucaramanga (en desarrollo)* [Tesis de Maestría en Geofísica, UIS].

Autoridad Nacional De Licencias Ambientales. (2018). *AUTO N°07715*.

CODE_BRIGHT. (2024). Deca. https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright

Díaz, L., & Peñarada, L. (2021). *Evaluación de metodologías disponibles para el cálculo de capacidad portante y asentamientos en rellenos sanitarios: Caso de estudio para el proyecto de un parque solar en la cárcava 1 del relleno sanitario El Carrasco de la ciudad de Bucaramanga* [Tesis de grado, UIS].

EMAB. (2016). *Plan de gestión integral de residuos sólidos 2016-2027*. <https://emab.gov.co/pgirs-municipal/>

Farzaneh, T. H., & Khabbaz, H. (2020). Performance comparison of a MSW settlement prediction model in Tehran landfill. *Journal of Environmental Management*, 254, Article 109809. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109809>

Franco, L. J., Meza, M. A., & Almeira, J. E. (2018). Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión). *Avances Investigación En Ingenierías*, 15(1), 180-193. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4735>

Leal, O., & Becerra, H. (2023). *Determinación de asentamientos en el relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga*. Universidad Industrial de Santander.

- Mora, J. (2019). *Aproximación a los problemas ambientales que se presentan en el relleno sanitario “El Carrasco” en Bucaramanga* [Tesis de grado, UPB].
- Ren, Y., Zhang, Z., & Huang, M. (2022). A review on settlement models of municipal solid waste landfills. *Waste Management, 149*, 79-95. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.019>
- Rivera, I. (2012). *Determinación de asentamientos teóricos en rellenos sanitarios* [Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
- Ribo, R., De Riera, M., Escolano, E., Suit, J., Font, L., & Gueto, E. (2018). GiD: Introducción al pre y postprocesador personal. In *GiD: Introducción al pre y postprocesador personal* (pp. 4–52). https://www.gidhome.com/ftp/pub/GiD_Convention/2002/courses/gid_basic_spanish/B0-CURSO%20B%C3%A1sico%20de%20gid.pdf
- Sivakumar, G. L., Reddy, K. R., Chouskey, S. K., & Kulkarni, H. S. (2010). Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 14*(2), 139-150. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.1944-8376.0000024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000024)
- Torrado, L. M., & Rondón, J. A. (n.d.). *Diseño de vertederos y rellenos sanitarios*. <https://www.ingeassas.com/diapositivas/RELLENOS-SANITARIOS-CASO-CARRASCO.pdf>
- Vega, B. F. G., Rojas, O. H. M., Prieto, D. C., Viviescas, A., & Jerez, C. A. R. (2023). Análisis de viabilidad estructural de un sistema de generación de energía solar fotovoltaica en un relleno sanitario. *Investigación e Innovación en Ingenierías, 11*(1), 173-186.
- Yepes, J. (2015). *Ajuste de un modelo para estimar asentamientos en el relleno sanitario La Pradera* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Yepes, J., & Villarraga, M. (2018). Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas. *Boletín de Ciencias de la Tierra, 43*, 24-33. <https://doi.org/10.15446/rbct.n43.61433>