

Evaluación de asentamientos en áreas clausuradas de rellenos sanitarios: Caso el Carrasco-  
Bucaramanga

María Alejandra Burbano Castro

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Civil

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Doctor en Estructuras

Codirector

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

*Este trabajo de grado lo dedico a mis padres Víctor Hugo Burbano Torres y Hilda Patricia Castro, por ser esas voces de aliento cuando necesito fuerza para continuar luchando por mis sueños. Gracias por su amor y dedicación a lo largo de toda mi vida.*

*A mis hermanos Vanesa, Laura, Sara y Santiago, por su amor y apoyo incondicional.*

*Ustedes son parte fundamental de mi vida.*

*A mi hermano Juan Felipe que fue, es y será el motor de mi vida a perpetuidad aun cuando su presencia física ya no me acompañe. Este logro es por ti y por mí. Te amo hoy, mañana y siempre.*

*A mi abuela Hilda Mercedes Josa, quien siempre estuvo presente en los momentos más importantes de mi vida y ahora me acompaña de manera etérea también. Sé que este momento habría sido tan importante para ti como lo es para mí.*

*A mí tía Diana Castro, la cual me brindó la oportunidad de ingresar a una universidad de calidad; me acompañó y guió en mis primeros pasos.*

*A quienes considero mi segunda familia, por acogerme y procurarme a lo largo de este proceso con paciencia y cariño.*

*A mi pareja, Julián Gonzalez, por su amor, compañía y la alegría que trae cada día a mi vida.*

*A todos aquellos amigos y familiares que me brindaron soporte en momentos de sosiego.*

*Para terminar, quiero dedicarlo a mis mascotas Molly y Chester por acompañarme en cada noche fría.*

### **Agradecimientos**

Quiero agradecer a la Universidad Industrial de Santander por la formación académica brindada.

A los directores de proyecto de grado el Ing. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes Ph.D. y Alvaro Viviescas Jaimes Ph.D. por su gran paciencia, comprensión, disposición y orientación durante la elaboración de este proyecto para el cumplimiento satisfactorio de los objetivos pactados en el mismo.

A los miembros del jurado calificador por su aprobación y contribución con la temática de este proyecto de grado.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivo general .....	18
1.1 Objetivos específicos .....	18
2. Generalidades.....	18
2.1 Relleno sanitario: “El Carrasco” .....	18
2.2 Cárcava I .....	19
2.3 Zona de estudio .....	20
3. Marco teórico .....	22
3.1 Caracterización de los residuos sólidos urbanos de un relleno sanitario. ....	22
3.2. Asentamientos en rellenos sanitarios .....	23
3.2.1 <i>Mecanismos de asentamiento</i> .....	24
3.2.1.1 Consolidación. ....	24
3.2.1.2 Mecánicos. ....	24
3.2.1.3 Ravelling .....	24
3.2.1.4 Fisicoquímicos. ....	24
3.2.1.5 Biodegradación. ....	24
3.2.1.6 Interacción.....	24
3.2.2 <i>Etapas de asentamiento en el tiempo</i> .....	25
3.2.3 <i>Factores que influyen en el asentamiento de residuos sólidos</i> .....	27
3.4 Software y análisis de elementos finitos. ....	27

3.4.1 <i>CODE_BRIGHT</i> y <i>GID</i> .....	28
3.4.2 <i>PLAXIS 2D</i> .....	28
3.5 Modelos constitutivos de los materiales .....	29
3.5.1 <i>Modelo viscoelástico: CODE_BRIGHT</i> .....	29
3.5.2 <i>Modelo de suelo blando Soft Soil Creep (SSC): PLAXIS 2D</i> .....	29
4. Metodología .....	31
4.1 Estado del arte.....	31
4.2 Datos de campo.....	31
4.2.1 <i>Reconocimiento y definición de puntos de muestreo</i> .....	32
4.2.2 <i>Espesores de capa y propiedades del suelo</i> .....	32
4.2.3 <i>Asentamientos en campo</i> .....	33
4.3. Modelado con elementos finitos .....	34
4.3.1 <i>Selección de modelos constitutivos</i> .....	34
4.3.2 <i>Calibración de modelos numéricos</i> .....	35
4.3.2.1 <i>Calibración de modelo numérico en Codebright.</i> .....	38
4.3.2.2 <i>Calibración de modelo numérico en Plaxis 2D</i> .....	39
4.4 Prognosis de asentamientos de estructura fotovoltaica.....	45
4.4.1 <i>Análisis de cargas</i> .....	45
4.4.2 <i>Proceso de carga de la estructura</i> .....	48
4.4.2.1 <i>Prognosis de asentamientos mediante Codebright</i> .....	48
4.4.2.2 <i>Prognosis de asentamientos mediante Plaxis 2D</i> .....	48
4.5. Análisis de sensibilidad.....	50

4.5.1 <i>Análisis de sensibilidad en Codebright</i> .....	50
4.5.2 <i>Análisis de sensibilidad en Plaxis 2D</i> .....	51
5. Resultados.....	51
5.1 Calibración de modelos numéricos en Codebright.....	51
5.2 Calibración de modelos numéricos en Plaxis 2D.....	52
5.3 Prognosis de asentamientos en Codebright.....	54
5.4 Prognosis de asentamientos en Plaxis 2D.....	55
5.5 Análisis de sensibilidad.....	55
5.5.1 <i>Análisis de sensibilidad en Codebright</i> .....	55
5.5.2 <i>Análisis de sensibilidad en Plaxis 2D</i> .....	56
6. Conclusiones.....	60
7. Recomendaciones.....	62
Referencias Bibliográficas.....	63
Apéndices.....	67

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Parámetros del modelo Soft Soil Creep en PLAXIS 2D</i> .....	30
Tabla 2 <i>Parámetros de rigidez alternativos</i> .....	30
Tabla 3 <i>Coordenadas de los puntos</i> .....	32
Tabla 4 <i>Perfil estratigráfico y propiedades del suelo de punto 1 y 2</i> .....	32
Tabla 5 <i>Comparativa entre los modelos constitutivos de PLAXIS 2D analizados</i> .....	36
Tabla 6 <i>Intervalos de tiempo y asentamientos para el punto 1</i> .....	37
Tabla 7 <i>Intervalos de tiempo y asentamientos para el punto 2</i> .....	37
Tabla 8 <i>Propiedades del suelo propuestas por la literatura</i> .....	40
Tabla 9 <i>Propiedades mecánicas de la placa de concreto en Plaxis 2D</i> .....	44
Tabla 10 <i>Fases de carga y sus tipos de análisis</i> .....	44
Tabla 11 <i>Peso de la estructura de soporte y paneles solares</i> .....	47
Tabla 12 <i>Peso de cada zapata aislada</i> .....	47
Tabla 13 <i>Peso de cada zapata aislada</i> .....	48
Tabla 14 <i>Peso de cada zapata aislada</i> .....	48
Tabla 15 <i>Fases de carga de la estructura y su tipo de análisis</i> .....	50

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Localización de las cárcavas y celdas del relleno sanitario “El Carrasco” y estado actual.....</i>	19
Figura 2 <i>Imagen satelital de la antigua celda I localizada en el relleno sanitario “El Carrasco” .....</i>	21
Figura 3 <i>Imagen satelital de alineamiento del estudio geofísico.....</i>	22
Figura 4 <i>Caracterización de los residuos sólidos Relleno Sanitario “El Carrasco”, Bucaramanga-Santander. ....</i>	23
Figura 5 <i>Clasificación temporal de los mecanismos de Asentamiento. ....</i>	25
Figura 6 <i>Curva teórica de compresibilidad Grisolia y Napoleoni (1995).....</i>	26
Figura 7 <i>Propiedades de las placas construidas por Becerra y Oriol (2023).....</i>	33
Figura 8 <i>Geometría y superficies para el punto 2. ....</i>	39
Figura 9 <i>Geometría y nivel freático para el punto 1. ....</i>	40
Figura 10 <i>Representación del proceso de carga para los puntos 1 y 2 en Plaxis 2D .....</i>	45
Figura 11 <i>Representación de la estructura fotovoltaica propuesta por Gutierrez y Mendoza. ...</i>	46
Figura 12 <i>Ilustración de dimensiones y refuerzo de las zapatas aisladas. ....</i>	46
Figura 13 <i>Geometría de simulación de asentamientos de la estructura fotovoltaica.....</i>	49
Figura 14 <i>Comparación de asentamientos medidos en campo y modelados en Codebright a partir del modelo elástico en el punto 1.....</i>	51
Figura 15 <i>Comparación de asentamientos medidos en campo y modelados en Codebright a partir del modelo elástico en el punto 2.....</i>	52

Figura 16 <i>Comparación de asentamientos medidos en campo y modelados en Plaxis 2D a partir del modelo SSC en el punto 1.</i> .....	53
Figura 17 <i>Comparación de asentamientos medidos en campo y modelados en Plaxis 2D a partir del modelo SSC en el punto 2.</i> .....	53
Figura 18 <i>Comparación de asentamientos modelados en Codebright de las zapatas 1 y 2 a partir del modelo viscoelástico en el punto 1.</i> .....	54
Figura 19 <i>Comparación de asentamientos modelados en Plaxis 2D de las zapatas 1 y 2 a partir del modelo SSC en el punto 1.</i> .....	55
Figura 20 <i>Asentamiento de las zapatas variando permeabilidad intrínseca en Codebright.</i> .....	56
Figura 21 <i>Asentamientos en el punto 1 variando cohesión en Plaxis 2D.</i> .....	56
Figura 22 <i>Asentamientos en el punto 1 variando ángulo de fricción en Plaxis 2D.</i> .....	57
Figura 23 <i>Asentamientos en el punto 1 variando OCR en Plaxis 2D.</i> .....	58
Figura 24 <i>Asentamientos en el punto 1 variando <math>C_c'</math> en Plaxis 2D.</i> .....	58
Figura 25 <i>Asentamientos en el punto 1 variando <math>C_r</math> en Plaxis 2D.</i> .....	59
Figura 26 <i>Asentamientos en el punto 1 variando <math>C_a'</math> en Plaxis 2D.</i> .....	59

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Estado del arte.....	67

### Glosario

A continuación, se exponen los conceptos de estos términos relacionados con rellenos sanitarios y actividades afines, con el propósito de facilitar una comprensión más profunda del tema que se está abordando.

**Cárcava:** Concavidad del talud en terrenos blancos o arcillosos formada por la erosión de corrientes de agua. (Díaz y Peñaralda, 2021)

**Celda:** Infraestructura localizada en el relleno sanitario para almacenar residuos sólidos. (Díaz y Peñaralda, 2021)

**Disposición final de residuos sólidos:** Proceso en el cual se confinan los residuos sólidos en forma definitiva en lugares especialmente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación, y riesgos a la salud humana y al ambiente (Sanguino, 2020).

**Lixiviado:** Líquido residual resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación o producido por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de las basuras bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas o como. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Decreto 2981, 2013)

**Parque fotovoltaico:** Grupo de paneles solares conectados a una red de distribución eléctrica. Son lugares conformados por un gran número de paneles fotovoltaicos individuales y cada uno posee una potencia diferente. (Cascano, 2022)

**Relleno Sanitario:** Lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de los residuos sólidos. (Ministerio de Ambiente, Vivienda, y Desarrollo Territorial, Decreto 838, 2005)

**Residuo Sólido Urbano (RSU):** Objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien que el generador presenta para su recolección por parte de la persona prestadora del servicio público domiciliario de aseo. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Decreto 2981, 2013)

## Resumen

**Título:** Evaluación de asentamientos en áreas clausuradas de rellenos sanitarios: Caso el Carrasco-Bucaramanga\*

**Autor:** María Alejandra Burbano Castro

**Palabras Clave:** Asentamientos; Rellenos Sanitarios; Modelación Numérica; Codebright; Plaxis 2D; Viscoelástico; Soft Soil Creep; Estructura fotovoltaica; Análisis de sensibilidad.

**Descripción:** En este proyecto se desarrollaron dos modelos numéricos utilizando softwares de elementos finitos, con el fin de evaluar los asentamientos producidos por una estructura fotovoltaica en la celda I de la cárcava I del relleno sanitario “El Carrasco” ubicado en la región de Bucaramanga, Santander, en un periodo de 20 años. Para ello, se modeló y analizó una cimentación compuesta por 2 zapatas flexibles de 60x60 [cm] apoyadas sobre la superficie del terreno, en representación de una estructura fotovoltaica, en los softwares Codebright y Plaxis 2D. El análisis se realizó utilizando los modelos constitutivos de materiales Viscoelástico y Soft Soil Creep (SSC), los cuales fueron seleccionados a partir de la literatura disponible. Para la calibración de los parámetros de los modelos, fueron utilizados los asentamientos tomados en campo, así como algunos valores obtenidos a partir de la literatura. Posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad en cada modelo, estableciendo las variables de mayor influencia en el asentamiento a corto y largo plazo. Finalmente se realizó un análisis comparativo entre los programas utilizados estableciendo posibles escenarios de comportamiento del relleno sanitario. Según los resultados, los modelos numéricos de Codebright y Plaxis no logran estabilizarse en 20 años, por lo que se esperan asentamientos mayores pasado el tiempo de prognosis. Según el análisis de sensibilidad, se identificó que los parámetros que influyen en el asentamiento primario y secundario de la estructura en el caso de Plaxis 2D son: Cohesión, ángulo de fricción interno, coeficiente de compresión primaria y re-compresión. Por su parte, aquellos factores que afectaron el asentamiento secundario fueron el coeficiente de re-compresión y OCR. En el caso de en Codebright se puede concluir que el modelo tuvo mayor sensibilidad al aumento de permeabilidad. Adicionalmente, la permeabilidad es inversamente proporcional al asentamiento.

---

\* Trabajo de Grado

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

### Abstract

**Title:** Settlement Evaluation in Closed Areas of Landfills: The Case of El Carrasco-Bucaramanga\*

**Author:** María Alejandra Burbano Castro\*\*

**Key Words:** Settlements; Landfills; Numerical Modeling; Codebright; Plaxis 2D; Viscoelastic; Soft Soil Creep; Photovoltaic structure; Sensitivity Analysis.

**Description:** In this project, two numerical models were developed using finite element software, in order to evaluate the settlements produced by a photovoltaic structure in cell I of gully I of the “El Carrasco” landfill located in the region of Bucaramanga, Santander, in a period of 20 years. To do this, a foundation composed of 2 flexible 60x60 [cm] footings supported on the ground surface was modeled and analyzed, representing a photovoltaic structure, in the Codebright and Plaxis 2D software. The analysis was carried out using the constitutive models of Viscoelastic and Soft Soil Creep (SSC) materials, which were selected from the available literature. For the calibration of the model parameters, the settlements taken in the field were used, as well as some values obtained from the literature. Subsequently, a sensitivity analysis was carried out on each model, establishing the variables with the greatest influence on short- and long-term settlement. Finally, a comparative analysis was carried out between the programs used, establishing possible behavioral scenarios of the landfill. According to the results, the Codebright and Plaxis numerical models fail to stabilize in 20 years, so greater settlements are expected after the forecast time. According to the sensitivity analysis, it was identified that the parameters that influence the primary and secondary settlement of the structure in the case of Plaxis 2D are: Cohesion, internal friction angle, primary compression coefficient, and recompression. For their part, those factors that affected secondary settlement were the recompression coefficient and OCR. In the case of Codebright, it can be concluded that the model had greater sensitivity to the increase in permeability. Furthermore, permeability is inversely proportional to settlement.

---

\* Degree Work

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

## Introducción

La cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) producidos por las ciudades está aumentando constantemente, provocando serios problemas para la salud pública como para el medio ambiente, y a su vez una creciente preocupación entre los ciudadanos respecto a la gestión y la eliminación adecuada de dichos desechos.

En respuesta a esta problemática, en el año 1977, se estableció el Relleno sanitario “El Carrasco” como un vertedero a cielo abierto que no contaba con el permiso ambiental correspondiente para la disposición final de residuos. Sin embargo, en el año 2003, luego de la adición de condiciones técnicas necesarias para el funcionamiento del relleno, se implementó el plan de manejo ambiental aprobado por la Corporación para el desarrollo de la meseta de Bucaramanga (CDMB). En la actualidad, las celdas y áreas de disposición en el relleno sanitario se encuentran en un estado de clausura, abandono y post-clausura, en cumplimiento con el plan de contingencia aprobado por la CDMB y decretado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo. (Díaz y Peñaralda, 2021)

En este contexto, el aprovechamiento de los suelos de los rellenos sanitarios clausurados representa una oportunidad valiosa. Estos terrenos pueden ser reutilizados para fines beneficiosos, como la rehabilitación ambiental, la optimización de recursos y la creación de infraestructuras y usos alternativos. En particular, se identifican tres áreas en este relleno sanitario que podrían ser estudiadas para evaluar su viabilidad técnica en la instalación de parques fotovoltaicos. Esta iniciativa promovería la transición hacia fuentes de energía renovable, reduciría la dependencia de los combustibles fósiles y contribuiría a la reducción de las emisiones de gases de efecto

invernadero, alineándose así con los objetivos de desarrollo sostenible. Con el objetivo de explorar esta oportunidad, el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de construcción (INME) de la Universidad Industrial de Santander ha venido desarrollando la propuesta de construcción de un parque fotovoltaico teniendo investigaciones previas sobre características y propiedades del suelo, como también del comportamiento de este.

Se debe tener en cuenta que las propiedades del suelo del relleno han cambiado en el tiempo por lo que se esperan condiciones heterogéneas en su comportamiento que pueden causar daños en las estructuras metálicas de soporte de paneles fotovoltaicos para el caso de paneles solares. En este contexto, es necesario evaluar los efectos geotécnicos en la instalación de una estructura fotovoltaica, con el fin de disminuir el riesgo de inestabilidad por asentamientos que por la deformabilidad de los RSU se producen en los rellenos sanitarios y que podrían afectar la integridad de esta.

Considerando lo expuesto, este proyecto propone llevar a cabo una serie de simulaciones numéricas utilizando dos softwares de simulación disponibles, CODEBRIGHT y PLAXIS 2D, con el fin de evaluar la capacidad de los modelos constitutivos para describir adecuadamente los asentamientos diferidos en el tiempo de materiales de este tipo. El objetivo es determinar si los modelos constitutivos seleccionados a partir de la literatura pueden proporcionar una representación precisa de los comportamientos de asentamiento a largo plazo observados en este tipo de materiales, y predecir el comportamiento del suelo en 15 años con los mismos. Este enfoque permitirá una evaluación más precisa de la respuesta geotécnica de los rellenos sanitarios y ayudará a mejorar la comprensión de los procesos de deformación y asentamiento en estos materiales a corto y largo plazo.

Para su desarrollo, fueron calibrados los modelos en cada software a partir de los resultados de asentamientos reales tomados en campo por Becerra y Oriol (2023) en la cárcava I, antigua celda I del sitio final de residuos sólidos “El Carrasco” y los valores de cada parámetro sugeridos por la literatura. Posteriormente se llevó a cabo la simulación numérica de la estructura fotovoltaica propuesta por Gutiérrez y Mendoza (2023) representada como dos zapatas cuadradas flexibles apoyadas de 60x60 [cm] en los estratos anteriormente calibrados con un periodo de análisis de 15 años. Finalmente, fueron analizados los asentamientos producto de la simulación, los parámetros que influyen dentro de la respuesta de asentamiento y los posibles escenarios que se pueden presentar a futuro.

## **1. Objetivo general**

Evaluar asentamientos en la zona 1 de la cárcava 1 del relleno sanitario el Carrasco de Bucaramanga utilizando al menos dos softwares de simulación disponibles.

### **1.1 Objetivos específicos**

Seleccionar un modelo constitutivo que permita establecer asentamientos diferidos en el tiempo de los disponibles en los softwares de simulación disponibles.

Evaluar mediante simulaciones numéricas los asentamientos inmediatos y diferidos en el tiempo asociados al área de estudio, utilizando los softwares de simulación disponibles.

Realizar un análisis comparativo entre los programas utilizados, estableciendo la sensibilidad de las principales variables y posibles escenarios de comportamiento del relleno sanitario.

## **2. Generalidades**

### **2.1 Relleno sanitario: “El Carrasco”**

El relleno sanitario conocido como "El Carrasco" se encuentra situado en la vía Girón-Bucaramanga, en una cañada natural dentro de los depósitos aluviales de la terraza de Bucaramanga-Santander. Se extiende a lo largo de 93.2 hectáreas, que se dividen en tres cárcavas naturales y cuatro celdas (Mora, 2019), y está equipado con una planta de tratamiento de lixiviados.

Este sitio es utilizado como lugar de disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados en Bucaramanga y 15 municipios del departamento de Santander, incluyendo

Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Rionegro, Playón, Matanza, Charta, Zapatoca, Betulia, Lebrija, California, Tona, Santa Bárbara y Suratá. El relleno es ejecutado y operado por la Empresa de Aseo de Bucaramanga EMAB S.A. E.S.P. y se estima que recibe aproximadamente 1020 toneladas de RSU al día (Díaz y Peñarada, 2021).

En la Figura 1 se puede observar la localización general de las cárcavas y celdas en el relleno sanitario “El Carrasco” al igual que su estado actual como área en clausura, post-clausurada o en operación, según el AUTO No 07715 emitido por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

### Figura 1

*Localización de las cárcavas y celdas del relleno sanitario “El Carrasco” y estado actual.*



*Nota.* Tomado de de Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, AUTO No 07015 del 2018.

## 2.2 Cárcava I

La cárcava I cuenta con una extensión de 17 hectáreas y se encuentra ubicada en su totalidad en la jurisdicción de la ciudad de Bucaramanga. Como se puede observar en la Figura 1 está conformada por dos zonas distintas: la Zona 1, la cual se encuentra en estado de clausura, y la Zona 2 (Zona Zem, Celda 1, 2 y 3) (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, Auto 00715,

2018). Surgió en 1985 tomando el lugar de la Cárcava II, un antiguo vertedero a cielo abierto que previamente había sido clausurado. Su operación se prolongó hasta el año 2016, momento en el que alcanzó su capacidad máxima tras recibir y gestionar alrededor de 1.300.000 toneladas de residuos generados por 15 municipios, en respuesta a emergencias sanitarias entre los años 2011 y 2016 (Autoridad Nacional de Licencias ambientales, Resolución N°00520, 2018). No obstante, en 2018, debido a un deslizamiento de residuos, se tomó la medida de reactivar un patio de disposición ubicado en la zona media de la celda 1 como una acción de contingencia (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, Auto 00715, 2018).

### **2.3 Zona de estudio**

Para objeto de esta investigación, la zona de análisis es la antigua celda 1 ubicada en la Cárcava I del relleno sanitario “El Carrasco” que puede ser observada en la imagen satelital Figura 2. La celda 1 (Clausurada) abarca un área de 2.2 hectáreas aproximadamente con una altura de 5 metros. (Franco et al, 2018). En esta área fueron dispuestos definitivamente los residuos, siguiendo un proceso diario de deposición de capas escalonadas de 0,5 metros mediante la creación de terrazas y celdas a lo largo de períodos establecidos. (Díaz y Peñaralda, 2021). residuos en las celdas 1, 2 y 4 de la cárcava 1. (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, Auto 00715, 2018). En el año 2011, cuando se cumplió el plazo máximo establecido por el Tribunal Administrativo de Santander para el cierre definitivo de El Carrasco, ninguno de los municipios que utilizaba este vertedero contaba con un lugar adecuado y autorizado por la CDMB para disponer de los residuos. Como resultado, se declaró la emergencia sanitaria mediante el Decreto 234, con el propósito de aprovechar la capacidad remanente de la celda contigua al área actual de disposición dentro del relleno sanitario. Posteriormente, la emergencia sanitaria fue prorrogada en el año 2012 por todos

los municipios mediante el Decreto 0056, en el año 2013 mediante el Decreto 190 y, finalmente, en el año 2015 mediante el Decreto 158, prolongándola por un período de dos años (Torrado y Rondón, s.f.). Esta extensión aplicaba específicamente a los servicios de disposición final de residuos en las celdas 1, 2 y 4 de la cárcava 1, según lo establecido en el Auto 00715 de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales en 2018.

En la actualidad, se encuentra en marcha un proceso de re-vegetalización que busca proteger el suelo contra la infiltración del agua y evitar la liberación de gases tóxicos. Para ello, se utiliza un revestimiento compuesto por geomembranas y una capa de material arcilloso con vegetación, (Manteniendo un espesor de 0.3 a 0.5 metros de altura) divididos por bermas. (Díaz y Peñaralda, 2021; Torrado y Rondón, s.f.)

Para el propósito de esta investigación, serán utilizados los datos recolectados por Becerra y Leal (2023) a partir de un alineamiento perteneciente a un estudio de geofísica, dentro de un área pequeña que forma parte de la Celda 1. Este alineamiento puede ser observado en la Figura 3.

## Figura 2

*Imagen satelital de la antigua celda I localizada en el relleno sanitario “El Carrasco”*



*Nota.* Tomado de *Google Earth*, 2023.

### **Figura 3**

*Imagen satelital de alineamiento del estudio geofísico*



*Nota.* Tomado de *Becerra y Leal*, 2023.

## **3. Marco teórico**

### **3.1 Caracterización de los residuos sólidos urbanos de un relleno sanitario.**

La caracterización de los residuos sólidos urbanos implica el análisis y clasificación de los desechos generados en áreas habitadas por la población. Estos residuos suelen ser una mezcla heterogénea de materiales, incluyendo papel, cartón, plásticos, vidrio, metales, materia orgánica y otros elementos. Su composición puede variar según la ubicación geográfica, el tamaño de la población, el nivel de desarrollo y las prácticas de gestión de residuos. En la Figura 4 se presenta la caracterización de los residuos sólidos de la ciudad de Bucaramanga, en la cual, según las caracterizaciones periódicas realizadas por la Empresa de Aseo de Bucaramanga S.A. (EMAB), al relleno sanitario “El Carrasco” ingresan en promedio 30.000 toneladas de residuos al mes provenientes de los municipios de; Bucaramanga, Girón, Floridablanca, Piedecuesta, Rionegro y

El Playón, en su mayoría los residuos que más son descargados en la celda activa corresponden a residuos orgánicos (Alrededor del 60%) y plástico (Aproximadamente 15%) (EMAB, 2022).

#### Figura 4

*Caracterización de los residuos sólidos Relleno Sanitario “El Carrasco”, Bucaramanga-Santander.*



*Nota.* Porcentajes de residuos sólidos tomado de Aprovechamiento y disposición de residuos EMAB, 2022.

### 3.2. Asentamientos en rellenos sanitarios

Tras su disposición y compactación en los rellenos sanitarios, los residuos sólidos urbanos (RSU) inician un proceso de deformación. Este proceso da lugar a asentamientos en la superficie, los cuales son ocasionados por la interacción de distintos mecanismos, a su vez influenciados por diversos factores. (Yepes, 2015)

### **3.2.1 Mecanismos de asentamiento**

La literatura actual describe los siguientes mecanismos de asentamiento en seis categorías principales:

**3.2.1.1 Consolidación.** Asentamiento en desechos saturados de baja permeabilidad generado por el escape de líquido intersticial. La velocidad de asentamiento se encuentra limitada por la velocidad en la cual los vacíos del suelo pueden reducir su volumen y en consecuencia aumentar la densificación de este. (Powrie et al, 2019)

**3.2.1.2 Mecánicos.** Se dan bajo el efecto del propio peso y fuerzas externas, en donde las partículas de los residuos urbanos sufren rupturas, distorsiones y reorientación. Adicionalmente se expulsa agua o líquido. (Yepez, 2015)

**3.2.1.3 Ravelling.** Abarcan la disolución, ablandamiento y lubricación entre partículas, la liberación de agua entre las mismas y la disipación del agua intersticial. por efecto de percolación o por cambios inducidos por la descomposición de los residuos. (Ren et al, 2022).

**3.2.1.4 Físicoquímicos.** Son el resultado de la corrosión, oxidación y combustión de los componentes inorgánicos de los RSU que provocan su colapso y compresión. (Ren et al, 2022).

**3.2.1.5 Biodegradación.** La materia orgánica en los RSU se biodegrada bajo condiciones adecuadas (Fermentación, descomposición aeróbica y anaeróbica) generando metano, dióxido de carbono y agua, lo que conduce a un aumento en la porosidad y eventual asentamiento. (Ren et al, 2022).

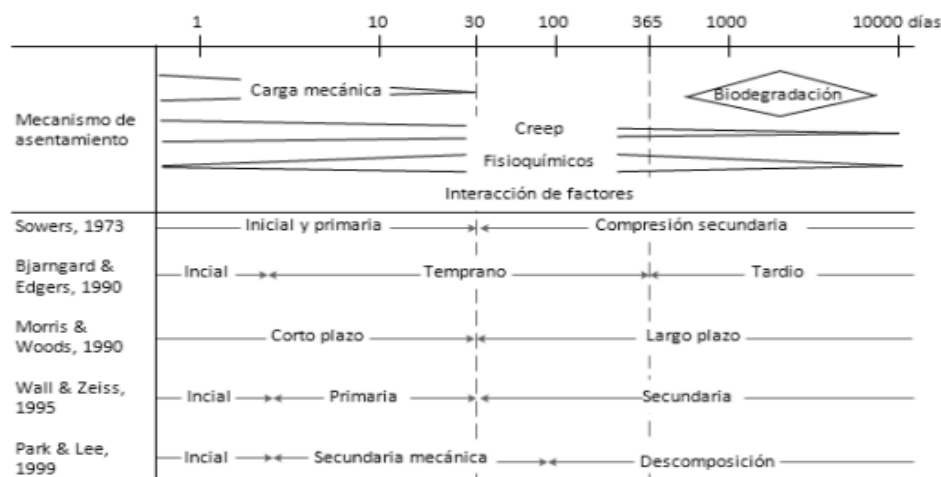
**3.2.1.6 Interacción.** Depende de los mecanismos mencionados anteriormente y de la presencia de oxígeno. Como resultado de la interacción de elementos como el metano y la combustión se obtiene la corrosión. (Rivera, 2012).

### 3.2.2 Etapas de asentamiento en el tiempo

McDougall (2008) compiló información de varios autores para clasificar en el tiempo los mecanismos de asentamiento, esta información puede ser observada en la Figura 5, en la cual se ilustra que en los primeros 30 días posteriores a la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU), los asentamientos se deben principalmente al peso de los residuos, lo que se llama asentamientos primarios. Después de este periodo, los asentamientos son causados por el creep, procesos fisicoquímicos y biodegradación. Esto se conoce como asentamientos secundarios y puede extenderse hasta 30 años. A lo largo del tiempo, los asentamientos debidos al creep disminuyen gradualmente, mientras que la importancia de la biodegradación aumenta después del primer año de disposición. Los mecanismos fisicoquímicos y de desagregación tienen menos influencia en comparación con la biodegradación, y, al igual que el creep, su efecto disminuye con el tiempo (Yepes García, 2015).

#### Figura 5

*Clasificación temporal de los mecanismos de Asentamiento.*

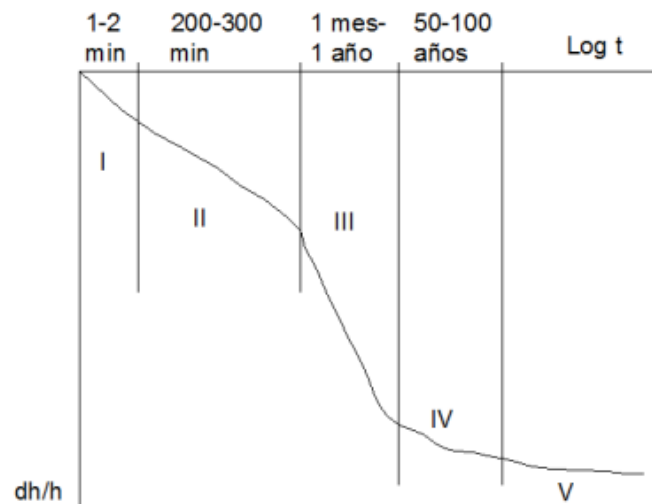


*Nota: Tomado de (Yepes García, 2015).*

Es importante destacar que la información recopilada proviene de estudios realizados en países desarrollados, los cuales tienen una composición de residuos distinta a la de Colombia, país en el que existe una notable presencia de material orgánico en los desechos. Para mejorar la precisión en la representación de los mecanismos de asentamiento en contextos no desarrollados, como Colombia, se puede emplear la curva teórica presentada por Grisolia, Napoleoni y adaptada por Ferreira (2000), que se muestra en la Figura 6. Esta curva identifica las siguientes etapas de asentamiento (Yepes García, 2015):

### Figura 6

*Curva teórica de compresibilidad Grisolia y Napoleoni (1995)*



*Nota: Tomado de (Yepes García, 2015).*

- Asentamiento inicial: Asentamiento instantáneo asociado a la compactación inmediata del espacio vacío y la trituración de partículas debido a la carga superpuesta. Se produce después de la aplicación de una carga externa, en este caso de la disposición de más residuos. (Ivanova,2008)

- Asentamiento primario: Asentamientos diferidos en el tiempo, causados por la disipación del exceso de la presión de agua en los poros del suelo y la dislocación de materiales inertes. (Yepes García, 2015).
- Asentamiento secundario (Creep): Producidos por acción de cargas constantes. (Yepes García, 2015).
- Asentamiento secundario: Producidos por la biodegradación de los residuos orgánicos. Esta fase disminuye paulatina y eventualmente concluye. (Yepes García, 2015).
- Asentamientos residuales: Fase de deformación que se prolonga en el tiempo debido a la compresión de residuos no orgánicos. (Yepes García, 2015).

### ***3.2.3 Factores que influyen en el asentamiento de residuos sólidos***

Los factores que influyen en el proceso de asentamiento de los residuos se dividen en internos y externos. Los internos son las propias características de los residuos, peso seco, densidad, rigidez de las partículas, contenido de humedad y materia orgánica, temperatura y el pH. Los factores externos son condiciones del sitio de disposición y su entorno, como la compactación, composición de los residuos, clima y manejo de lixiviados. Al principio, la forma, compactación y secuencia de llenado son determinantes en la biodegradación de los residuos, con el tiempo, el clima y el manejo de lixiviados también tienen impacto en el proceso (Yepez, 2015).

### **3.4 Software y análisis de elementos finitos.**

El método de los elementos finitos (Finite elementh methods, FEM) es un procedimiento numérico en el que la masa considerada se representa mediante un conjunto de elementos interconectados en un número finito de puntos nodales y da como resultado una malla con un vector de tensión o deformación. Las deformaciones son determinadas a partir del comportamiento

tensión-deformación del material considerado (Omari,2012). Existen diferentes softwares para el análisis de asentamientos en rellenos sanitarios que utilizan el método FEM para su cálculo, en este caso seleccionamos el software de código abierto CODE\_BRIGHT y de pago PLAXIS 2D de acuerdo con la aplicación descrita a continuación.

### **3.4.1 CODE\_BRIGHT y GID**

Code\_Bright es un programa de FEM diseñado específicamente para resolver problemas acoplados termo-hidráulico-mecánicos (THM) en medios geológicos. Este software hace uso del pre y post-procesador universal de simulaciones GID, el cual se encarga de definir, preparar, visualizar la información necesaria para la simulación numérica, generar la malla de elementos finitos y escribir toda la información para que sea compatible con CODE\_BRIGHT. (Olivella et al. 1996)

### **3.4.2 PLAXIS 2D**

PLAXIS 2D es un programa FEM bidimensional, diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos en proyectos de ingeniería. Adicionalmente, ofrece funciones avanzadas como la calibración de modelos de materiales, fiabilidad mejorada mediante una biblioteca de modelos constitutivos y acceso a funcionalidades de análisis de sensibilidad y variación de parámetros. Su interfaz gráfica permite a los usuarios generar rápidamente modelos geométricos y mallas de elementos finitos basados en secciones transversales representativas de los problemas que se enfrentan, como también la visualización de fuerzas, desplazamientos, tensiones y datos de flujo en salida. (PLAXIS 2D, 2023)

### **3.5 Modelos constitutivos de los materiales**

Un modelo constitutivo se compone de un conjunto de ecuaciones matemáticas que establecen una relación entre las tensiones y las deformaciones. En general, los modelos de materiales se formulan de manera que los aumentos en las tensiones ocasionen aumentos en las deformaciones. En particular, aquellos utilizados en el contexto de elementos finitos se fundamentan en las relaciones entre los incrementos de tensiones efectivas y los incrementos de deformación (Tejedor,2014). Los softwares anteriormente descritos tienen diferentes modelos constitutivos de acuerdo con las características del suelo y el tipo de problema que se quiera tratar. En este caso se describirá los modelos constitutivos seleccionados para cada programa. La razón de la selección de estos modelos será descrita en la metodología empleada para el desarrollo de este proyecto.

#### **3.5.1 Modelo viscoelástico: *CODE\_BRIGHT***

Este modelo se basa en el mecanismo de deformación conocido como fluencia por disolución FADT (Fluid Assisted Diffusional Transfer), el cual implica la migración de la sal a través de una fase líquida, causando deformación en la superficie del material. Se utiliza para simular procesos hidromecánicos en escombreras de sal y la transferencia de masa tanto dentro del cristal como entre diferentes cristales. Este fenómeno es resultado de gradientes de potencial químico presentes en la solución acuosa, que se originan debido a concentraciones locales en el campo de tensiones. (Jiang, 2015)

#### **3.5.2 Modelo de suelo blando *Soft Soil Creep (SSC): PLAXIS 2D***

Las características de este modelo serán presentadas en la Tabla 1. Los parámetros para tener en cuenta en este modelo son:

**Tabla 1***Parámetros del modelo Soft Soil Creep en PLAXIS 2D*

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Detalle</b>	<b>Unidades</b>
<b>Parámetros de falla</b>			
<b>C</b>	Cohesión	Pendiente de la línea de falla del criterio de falla Morh Coulomb	KN/m <sup>2</sup>
$\phi$	Angulo de fricción	Interseccion en “y” de la línea de falla del criterio de falla Morh Coulomb	°
$\psi$	Angulo de dilatación	Funcion de $e_a$ y $e_v$	°
<b>Parámetros básicos de rigidez</b>			
$\lambda^*$	Indice de compresión modificado	$\lambda^* = \frac{C_c}{2.3(1+e)}$	-
$k^*$	Indice de hinchazón modificado	$k^* = \frac{C_r}{2.3(1+e)}$	-
$\mu^*$	Indice de fluencia modificado	$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2.3(1+e)}$	-
<b>Parámetros avanzados</b>			
$\nu_{ur}$	Relación de Poisson para descarga - recarga	Máximo de 0,3	-
$K^{0_{nc}}$	Relación de presión de la tierra en reposo	$1 - \text{sen}\phi$	-

*Nota.* Esta tabla menciona los parámetros del modelo Soft Soil Creep junto a sus formas de cálculo.

Como se puede observar en la Tabla 1, los parámetros de rigidez básicos pueden ser calculados a partir de parámetros de rigidez alternativos por el software, los cuales están dados por las constantes de materiales que aparecen en la Tabla 2.

**Tabla 2***Parámetros de rigidez alternativos*

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidades</b>
$C_c$	Cohesión	KN/m <sup>2</sup>
$C_r$	Angulo de fricción	°
$C_\alpha$	Angulo de dilatación	°

e	Indice de compresión modificado	-
---	------------------------------------	---

*Nota.* Esta tabla menciona los parámetros de rigidez alternativos para el cálculo de los parámetros básicos de rigidez.

## 4. Metodología

### 4.1 Estado del arte

Para el desarrollo de esta investigación se realizó una revisión bibliográfica detallada, con la finalidad de conocer los posibles modelos numéricos y matemáticos para predicción de asentamientos, junto a los parámetros del suelo de este relleno que podrían ser útiles para modelación numérica. Se consideraron rellenos en estado clausurado, no clausurado y en diseño. En el anexo 1 se presenta un resumen detallado de los resultados de esta revisión bibliográfica. A partir de esto, fueron seleccionados los softwares de simulación numérica de elementos finitos, los parámetros de referencia no especificados por estudios de campo y los principales modelos constitutivos para la modelación.

### 4.2 Datos de campo

Fueron tomados en cuenta los asentamientos medidos en campo del proyecto titulado “Determinación de asentamientos en el relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga” desarrollado por Becerra y Oriol (2023) y las propiedades del suelo del estudio geofísico en desarrollo “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” realizado por Jesus Álvarez (2023) en 2 puntos de muestreo en un alineamiento dentro de la zona de estudio seleccionada.

#### 4.2.1 Reconocimiento y definición de puntos de muestreo

El punto de georreferenciación fue seleccionado fuera del relleno sanitario por Álvarez (2023) dada la no presencia de asentamientos en él. De igual forma, los puntos de muestreo y aplicación de la carga fueron seleccionados a partir del alineamiento realizado por el mismo autor, como se observa en la Figura 3. A partir de la información dada por Álvarez (2023) definieron el "Punto 1" debido a su baja rigidez observada en el estudio geofísico, por lo cual se esperarían mayores asentamientos. Finalmente seleccionaron otro punto al alzar dentro del alineamiento denominado “Punto 2” con el fin de tener una aproximación de las propiedades del suelo en el que se hicieron las mediciones. Las coordenadas del punto de georreferenciación y punto 1 y 2 se encuentran en la Tabla 3 en coordenadas Magna Sirgas 3116.

**Tabla 3**

*Coordenadas de los puntos.*

Punto	Coordenadas en Magna Sirga 3116	
	N	E
<b>Georreferencia</b>	1274600.675	1103044.689
<b>Punto 1</b>	1274627.155	1103215.356
<b>Punto 2</b>	1274635.561	1103203.236

Nota: Tomado de Becerra y Oriol (2023)

#### 4.2.2 Espesores de capa y propiedades del suelo

El perfil estratigráfico y propiedades del suelo de los 2 puntos fueron tomados por el estudio de Alvarez (2023) y se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Perfil estratigráfico y propiedades del suelo de punto 1 y 2.*

Capa	Espesor		Coeficiente de Poisson $\sigma$	Densidad d	Porosidad n	Permeabilidad intrínseca k
	Punto 1	Punto 2				

	m	m	-	Kg/m <sup>3</sup>	-	m <sup>2</sup>
<b>1</b>	0,503	0,503	0,444	1302,089	0,600	3,88332E-11
<b>2</b>	0,410	0,624	0,443	1302,066	0,520	3,33456E-11
<b>3</b>	1,000	1,278	0,443	1301,893	0,450	2,85440E-11
<b>4</b>	1,000	2,223	0,445	1301,867	0,400	2,51142E-11
<b>5</b>	4,000	2,500	0,444	1305,871	0,350	2,16845E-11
<b>6</b>	3,500	3,500	0,438	1316,532	0,300	1,82547E-11

Nota: Tomado de Alvarez [En desarrollo] (2023)

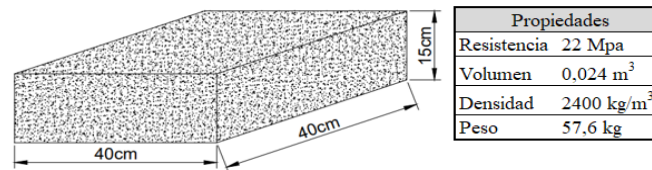
#### 4.2.3. Asentamientos en campo

La medición de asentamientos en campo se realizó a partir de un proceso de aplicación sucesiva de carga y medición simultánea de asentamientos. Para ello, Becerra y Leal, construyeron 9 placas de concreto que fueron apoyadas en el suelo del punto 1 y 2 simulando un incremento de carga (Becerra y Leal, 2023). Las propiedades de las placas de concreto pueden ser observadas en la Figura 7.

Inicialmente, se ajustaron los asentamientos a cero en los puntos seleccionados, posteriormente, realizaron un incremento de carga, en el cual fueron medidos asentamientos cada 2 minutos durante un periodo de 10 minutos. Este proceso fue repetido 8 veces más hasta lograr 9 incrementos de carga, que corresponden a un total de 518,4 kg, es decir un esfuerzo de contacto de 3240 kg/m<sup>2</sup>. Los asentamientos posteriores fueron medidos durante 4 horas cada 20 minutos. A partir del comportamiento de los desplazamientos, los autores aumentaron progresivamente los intervalos de medición de datos, hasta aproximadamente el día 23 en el punto 1 y 22 en el punto 2. El equipo utilizado para la medición de asentamientos correspondió a un nivel digital EL302A el cual cuenta con una precisión de  $\pm 0.7$  mm (Becerra y Leal, 2023)

#### Figura 7

*Propiedades de las placas construidas por Becerra y Oriol (2023)*



*Nota: Elaboración propia.*

### 4.3. Modelado con elementos finitos

Existen diferentes softwares para el análisis de asentamientos en rellenos sanitarios que utilizan el método de elementos finitos (FEM) para su cálculo, en este caso se seleccionaron los softwares: Codebright y Plaxis 2D.

En este apartado se explicará el proceso de selección de los modelos constitutivos para cada software, la calibración de estos con el objetivo de conocer las propiedades del suelo y finalmente el proceso de modelado y predicción del asentamiento producido por la estructura fotovoltaica propuesta por Gutiérrez y Mendoza (2023)

#### 4.3.1 Selección de modelos constitutivos

A partir del estado del arte, se realizó un análisis bibliográfico de los principales modelos utilizados para llevar a cabo simulaciones numéricas de predicción de asentamientos en rellenos sanitarios, para cada software.

En el caso de Codebright, Becerra y Leal (2023) seleccionaron el modelo constitutivo elástico y viscoelástico para el modelado numérico del proceso de carga en los puntos 1 y 2. Según Rincon (2018), el modelo viscoelástico es predominante en la deformación en este tipo de materiales con presencia de agua, ya que tienen en cuenta los procesos de disolución y reprecipitación que juegan un papel clave para entender los asentamientos producido.

En el caso de Plaxis 2D, se realizó un análisis comparativo de los principales modelos constitutivos utilizados en la literatura disponible. En la Tabla 3, se pueden observar detalladamente los resultados de esta comparación. Teniendo en cuenta esta información, fue seleccionado el modelo Soft Soil Creep (SSC), ya que describe de forma completa las propiedades de suelo blando como rigidez dependiente de la tensión y creep generado por la consolidación secundaria (Remez y Osipova, 2016). De igual forma, logra capturar la naturaleza de asentamiento de rellenos sanitarios si el modelo es construido capa a capa, de acuerdo con las fases de degradación tratadas (Firgi y Telekes, 2016).

#### ***4.3.2 Calibración de modelos numéricos***

Con el fin de evaluar cómo los asentamientos evolucionan durante la prueba de carga, se ajustaron los modelos constitutivos empleados en los softwares de elementos finitos Plaxis 2D y Codebright. Para ello, se llevó a cabo una simulación para cada punto de acuerdo con su geometría, superficie y carga aplicada. La geometría de los modelos numéricos fue creada a partir de los espesores de capa de la Tabla 4. Los intervalos de tiempo acumulados en los cuales se midieron asentamientos a partir de la aplicación de incrementos de carga pueden ser observados en la Tabla 6 y 7 para los puntos 1 y 2 respectivamente (Becerra y Leal, 2023).

A partir de esta información, se realizaron las simulaciones numéricas del proceso de carga y asentamientos teóricos. Estas simulaciones numéricas se desarrollaron en condición saturada, simulando la condición más crítica. De igual forma, cada modelo tuvo un intervalo de acondicionamiento para replicar el estado inicial de esfuerzos en condición geo-estática.

En el caso del intervalo de acondicionamiento geo-estático, los asentamientos obtenidos a partir de este intervalo fueron igualados a cero ya que corresponden al tiempo de deposición,

**Tabla 5**

*Comparativa entre los modelos constitutivos de PLAXIS 2D analizados.*

Comparación	Mohr Coulomb (MC)	Hardening Soil (HS)	Soft Soil Creep (SSC)
<b>Características Generales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo lineal elástico perfectamente plástico.</li> <li>Representa una aproximación de "primer orden" del comportamiento del suelo.</li> <li>Rigidez constante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo elastoplástico rigidizable.</li> <li>Influyen condiciones iniciales de pre-consolidación.</li> <li>Rigidez dependiente de la tensión</li> <li>Carga y re-carga elásticas.</li> <li>Comportamiento de falla según el criterio Mohr-Coulomb.</li> <li>Deformaciones plásticas debido a carga desviatoria y compresión primaria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo elasto-plástico no lineal</li> <li>Influyen condiciones iniciales de pre-consolidación.</li> <li>Rigidez dependiente de la tensión.</li> <li>Distinción entre carga primaria y carga-descarga.</li> <li>Compresión secundaria dependiente del tiempo.</li> <li>Comportamiento de falla según el criterio Mohr-Coulomb.</li> <li>Envejecimiento de la tensión previa a la consolidación.</li> <li>Deformaciones elásticas instantáneas y deformaciones plásticas viscosas dependientes del tiempo.</li> </ul>
<b>Tipo de suelo</b>	Granulares sueltos o finos, normalmente consolidados	Generalmente adecuado para todo tipo de suelos blandos o rígidos.	Blandos, arcillas, limos y turbas normalmente consolidadas
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cálculos más rápidos de deformación, debido a la rigidez constante.</li> <li>Fácil de usar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor precisión al describir rigidez ya que tiene en cuenta la rigidez triaxial, de descarga triaxial, y la de carga de edómetro.</li> <li>Superficie tapón que controla las deformaciones volumétricas irreversibles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiene en cuenta la fluencia volumétrica y la fluencia desviatoria. Al considerar la fluencia, tiene en cuenta asentamientos por creep y biodegradación a largo plazo.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La superficie de fluencia no se ve afectada por deformaciones plásticas.</li> <li>No tiene en cuenta la dependencia de la tensión de los módulos de rigidez.</li> <li>No tiene en cuenta el fenómeno de la dilatancia.</li> <li>No considera la posible anisotropía de la rigidez.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No tiene en cuenta los efectos de la viscosidad (Creep y disminución de tensiones) por lo que no tiene en cuenta asentamiento secundarios considerables y se estabiliza después de la etapa de asentamiento inicial.</li> <li>No incluye el reblandecimiento asociado a la dilatancia y fisuración.</li> <li>No reproduce ciclos de carga o deformación.</li> <li>No considera la gran rigidez del suelo a pequeñas deformaciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prolonga en exceso el rango elástico del material, especialmente en problemas de descarga.</li> </ul>
<b>Aplicación</b>	Recomendado para primeros análisis del problema considerado y problemas de descarga como túneles o excavaciones.	Recomendado para todo tipo de problemas.	Recomendado para problemas de asentamiento de cimientos, terraplenes, etc. en suelos blandos.

*Nota.* Esta tabla menciona las características principales de cada modelo constitutivo junto a sus ventajas y desventajas. Fuente:

Elaboración propia

compactación y consolidación por peso propio y flujo del relleno sanitario durante su tiempo de vida y clausura. Posteriormente, fueron calibrados los asentamientos por la aplicación de cargas superficiales, modificando las propiedades del suelo de acuerdo con su modelo constitutivo hasta obtener los desplazamientos deseados. Se debe tener en cuenta que la “presión de agua” en estos modelos se refiere a la presión del líquido correspondiente a una mezcla entre agua y lixiviado.

**Tabla 6**

*Intervalos de tiempo y asentamientos para el punto 1.*

No.	Carga Kg	Esfuerzo de contacto MPa	Punto 1		Asentamientos mm
			Intervalo de tiempo [min]		
			Inicio	Fin	
1	57,6	0,0035	0,0	9,2	0,23
2	115,2	0,0071	9,2	26,5	0,55
3	172,8	0,0106	26,5	39,9	1,87
4	230,4	0,0141	39,9	55,0	3,47
5	288	0,0177	55,0	68,3	4,68
6	345,6	0,0212	68,3	86,5	5,59
7	403,2	0,0247	86,5	100,8	6,86
8	460,8	0,0282	100,8	135,1	9,05
9	518,4	0,0318	135,1	152,1	10,06
10	-	0,0318	152,1	283,3	11,63
11	-	0,0318	283,3	2903,5	17,12
12	-	0,0318	2903,5	14557,2	20,28
13	-	0,0318	14557,2	23223,4	23,07
14	-	0,0318	23223,4	33217,8	23,22

*Nota: Tomado de Becerra y Oriol (2023)*

**Tabla 7**

*Intervalos de tiempo y asentamientos para el punto 2.*

No.	Carga Kg	Esfuerzo de contacto MPa	Punto 2		Asentamientos mm
			Intervalo de tiempo [min]		
			Inicio	Fin	
1	57,6	0,0035	0,0	10,5	0,2
2	115,2	0,0071	10,5	24,4	0,76

<b>3</b>	172,8	0,0106	24,4	37,7	1,48
<b>4</b>	230,4	0,0141	37,7	51,2	2,2
<b>5</b>	288	0,0177	51,2	64,8	2,95
<b>6</b>	345,6	0,0212	64,8	79,2	4,37
<b>7</b>	403,2	0,0247	79,2	92,4	4,8
<b>8</b>	460,8	0,0282	92,4	112,1	5,26
<b>9</b>	518,4	0,0318	112,1	123,0	5,43
<b>10</b>	-	0,0318	123,0	309,9	6,1
<b>11</b>	-	0,0318	309,9	4443,6	7,94
<b>12</b>	-	0,0318	4443,6	11600,7	11,42
<b>13</b>	-	0,0318	11600,7	20265,4	18,34
<b>14</b>	-	0,0318	20265,4	31761,5	18,44

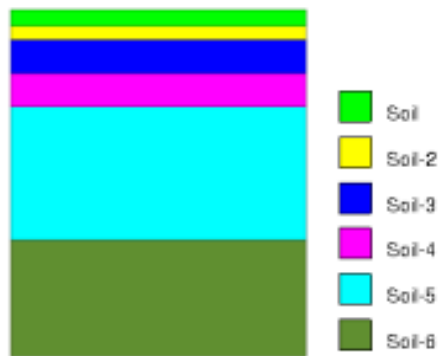
*Nota: Tomado de Becerra y Oriol (2023)*

**4.3.2.1 Calibración de modelo numérico en Codebright.** En el caso del análisis con el software Codebright, se tomó como referencia la calibración inicial desarrollada por Becerra y Leal (2023), gracias a su capacidad para representar de manera cercana los asentamientos del modelo numérico respecto a los observados en el campo. Las propiedades mecánicas del suelo como: módulo de Young, relación de Poisson y porosidad, fueron asignadas a partir de una superficie. Las propiedades hidráulicas como permeabilidad intrínseca fueron agregadas considerando los valores máximos y mínimos de acuerdo con el estudio realizado por Alvarez (2023). Los modelos numéricos realizados combinan dos modelos constitutivos: Elástico y viscoelástico. La calibración de los asentamientos durante la fase de carga se efectuó utilizando el modelo elástico, mientras que, para representar el comportamiento hidromecánico en intervalos de tiempo posteriores, fue empleado el modelo viscoelástico. El análisis numérico cuenta con un marco hidromecánico acoplado a temperatura constante, por lo que, puede presentar variaciones en la presión de agua, flujo, cambios de porosidad, esfuerzos efectivos e incrementos de deformación diferidos en el tiempo, dependiendo de las condiciones de contorno y permeabilidad

del modelo. Luego, iteraron el módulo de elasticidad de cada estrato de acuerdo con los intervalos de carga de las Tablas 6 y 7, mientras que el módulo de Poisson permaneció constante. A partir del ajuste realizado, introdujeron variables adicionales para el análisis viscoelástico como, densidad (2450 kg/m<sup>3</sup>), tamaño de partícula, energía de activación (2700 J/mol) y el parámetro pre-exponencial (Becerra y Leal, 2023). En la Figura 8, se puede observar la geometría y superficies del punto 2, en el software Codebright.

### Figura 8

*Geometría y superficies para el punto 2.*

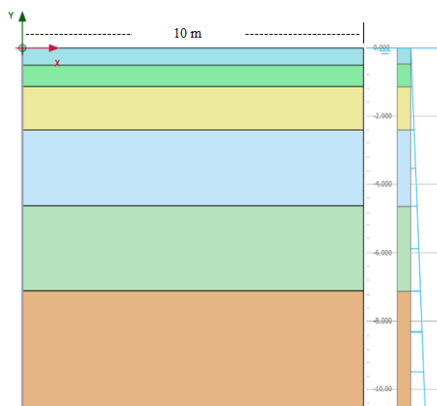


*Nota: Tomado de Becerra y Oriol (2023)*

**4.3.2.2 Calibración de modelo numérico en Plaxis 2D.** Fueron creados 2 modelos “Plane Strain” de 15-nodos, con suelo arcilloso y nivel freático en superficie. Se aplicaron condiciones de contorno al modelo para simular las condiciones de contorno de campo en las que a los límites izquierdo y derecho Con restricción de desplazamiento lateral en los bordes del modelo. Por otro lado, tanto el movimiento vertical como el horizontal en la base del modelo estaban restringidos, lo que significa cero desplazamientos tanto en la dirección vertical como en la horizontal. En la Figura 9, se puede observar la geometría y nivel freático del punto 1, en el software Plaxis 2D.

**Figura 9**

*Geometría y nivel freático para el punto 1.*



*Nota: Elaboración propia.*

En ausencia de datos de laboratorio, los parámetros del modelo constitutivo Soft Soil Creep, fueron tomados a partir de los valores sugeridos por la literatura disponible y los valores delimitados dentro del software. Estos datos son resumidos en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Propiedades del suelo propuestas por la literatura.*

Parámetro	Símbolo	Valor	Fuente
<b>Coficiente de compresión primario modificado</b>	$C_c'$	0,21	B.M. Basha, N. Parakalla, K.R. Reddy
<b>Coficiente de compresión secundario modificado</b>	$C_\alpha'$	0,012	B.M. Basha, N. Parakalla, K.R. Reddy
<b>Angulo de fricción</b>	$\varphi$	20-30 ° 20-35 °	PLAXIS 2D, Reference Manual. B.M. Basha, N. Parakalla, K.R. Reddy
<b>Angulo de dilatancia</b>	$\psi$	0	PLAXIS 2D, Reference Manual.
<b>Cohesión</b>	$C$	0-30	B.M. Basha, N. Parakalla, K.R. Reddy
<b>Módulo de Poisson</b>	$\nu$	0,3	PLAXIS 2D, Reference Manual.
<b>OCR</b>	-	1,2-1,4 (O mayores)	PLAXIS 2D, Reference Manual.

*Nota: Elaboración propia.*

El programa permite la posibilidad de trabajar a partir de los parámetros de rigidez alternativos:  $C_c$ ,  $C_r$  y  $C_\alpha$ . Para calcular estos parámetros a partir de  $C_c'$ ,  $C_\alpha'$ , serán utilizadas las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), de acuerdo con Basha, et al (2016) y GEO 5 (s.f.)

$$C_c = C_c' * (1 + e) \quad (1)$$

$$C_\alpha = C_\alpha' * (1 + e) \quad (2)$$

$$C_r \cong \left( \frac{1}{5} \sim \frac{1}{10} \right) C_c \quad (3)$$

$$e_o = \frac{n}{1 - n} \quad (4)$$

Donde:

- $C_c'$  : Coeficiente de compresión primaria modificado.
- $C_c$  : Coeficiente de compresión primaria
- $C_\alpha'$  : Coeficiente de compresión secundaria modificado.
- $C_\alpha$ : Coeficiente de compresión secundaria.
- $C_r$  : Coeficiente de re-compresión.
- $e$  : Relación de vacíos.
- $n$  : Porosidad.

Cada valor de  $C_c$ ,  $C_r$  y  $C_\alpha$  fue calculado a partir de la porosidad de cada estrato. A partir de los datos, sugeridos por los autores, se iteraron  $C_c'$ ,  $C_\alpha'$ , hasta encontrar el valor de asentamiento deseado. Para la iteración se tuvieron en cuenta los límites propuestos por el software en los cuales se especifica que:

$$2,5 \leq \frac{\lambda^*}{\kappa^*} \leq 5 \text{ y } 15 \leq \frac{\lambda^*}{\mu^*} \leq 25$$

Donde:

- $\lambda^*$ : Índice de compresión modificado.
- $\kappa^*$ : Índice de hinchamiento modificado.
- $\mu^*$ : Índice de fluencia modificado.

Para esta comprobación,  $\lambda^*$ ,  $\kappa^*$  y  $\mu^*$  pueden ser calculados a partir de las ecuaciones (5), (6) y (7), de acuerdo con el manual de Plaxis 2D (PLAXIS 2D, 2023)

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2.3(1 + e)} \quad (5)$$

$$k^* = \frac{C_r}{2.3(1 + e)} \quad (6)$$

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2.3(1 + e)} \quad (7)$$

Debido a la gran cantidad de variables a iterar, se definió el siguiente orden de ajuste: Cohesión, Ángulo de fricción interno, OCR, coeficiente de compresión primario, coeficiente de re-compresión y coeficiente de compresión secundario. Este orden fue seguido hasta encontrar aquellos asentamientos que mejor representaran la naturaleza de asentamiento de los puntos de medición en campo. Las propiedades hidráulicas fueron definidas de acuerdo con lo sugerido por el programa. El análisis de permeabilidad fue definido como “Undrained” o no drenado en fase de carga, ya que durante este proceso el relleno experimentó una carga donde no se permitió el drenaje. Posteriormente, para la predicción de asentamientos de la estructura esta fase fue considerada como drenada. Para simular el proceso de carga, fue necesario crear una placa para representar las condiciones de transmisión de la carga en campo, la cual cuenta con propiedades

como: Modulo de elasticidad, rigidez axial y a flexión. Se debe tomar en cuenta que el análisis fue realizado en 2 dimensiones, por lo que el análisis se realiza por metro de profundidad. De acuerdo con el título C de la Norma Sismo-resistente colombiana (NSR), para concreto de densidad normal (2400 kg/m<sup>3</sup>), el módulo de elasticidad del concreto puede ser calculado utilizando la ecuación (8).

$$E_c = 4700\sqrt{f'c} = [MPa] \quad (8)$$

Donde:

- $E_c$  : Modulo de elasticidad del concreto.
- $f'c$ : Resistencia del concreto.

De igual forma, la inercia con respecto al eje “y” fue calculada utilizando la ecuación (9)

$$I_y = \frac{b * h^3}{12}; b = 1 [m]$$

Donde:

- $b$  : Ancho del bloque de concreto.
- $h$  : Altura del bloque de concreto.

Finalmente, se tomó un valor de módulo de Poisson de 0,2 de acuerdo con la recomendación del título C de la NSR, en el cual sugiere este valor para casos donde no se disponga de un valor experimental. En resumen, las propiedades mecánicas de la placa de concreto aparecen en la Tabla 9. La interacción entre el suelo y las placas de concreto se modeló mediante una interfaz. En este caso la interfaz fue utilizada para reducir la fricción entre las placas de concreto y el suelo. Esto se consigue mediante el parámetro de la interfaz  $R_{inter}$  que tiene valores entre 0,01

(Nula fricción entre elemento y el suelo) y 1 (Completo contacto entre el elemento y el suelo, sin deslizamiento). En este caso fue escogido un valor de  $R_{inter} = 1$ .

**Tabla 9**

*Propiedades mecánicas de la placa de concreto en Plaxis 2D.*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Material	-	Elastico	-
Rigidez axial	EA1	8,8180E+06	KN/m
Rigidez a flexión	EI	6,2001E+03	KN m <sup>2</sup> /m
Módulo de Poisson	$\nu$	0,2	-

*Nota: Elaboración propia.*

Para la simulación de del proceso de carga fueron creadas líneas de carga que aumentaron con cada fase. En la Tabla 10 se puede observar el número de fases definidas en el programa junto a los tipos de cálculo seleccionados.

**Tabla 10**

*Fases de carga y sus tipos de análisis.*

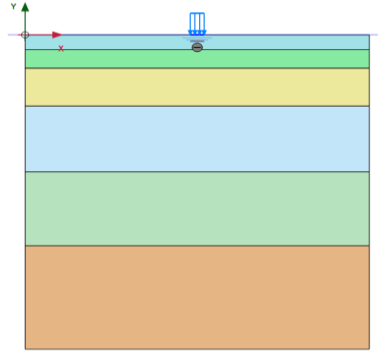
Fase	Nombre	Calculation type	Loading type	Pore pressure Calculation type	Reset displacements to zero
1	Acondicionamiento	K0 procedure	Staged construction	Phreatic	Yes
2	Carga 1	Plastic	Staged construction	Phreatic	No
3	Carga 2	Plastic	Staged construction	Phreatic	No
4	Carga 3	Plastic	Staged construction	Phreatic	No
5	Carga 4	Plastic	Staged construction	Phreatic	No
6	Carga 5	Plastic	Staged construction	Phreatic	No
7	Carga 6	Plastic	Staged construction	Phreatic	No
8	Carga 7	Plastic	Staged construction	Phreatic	No
9	Carga 8	Plastic	Staged construction	Phreatic	No
10	Carga 9	Plastic	Staged construction	Phreatic	No

*Nota: Elaboración propia.*

Finalmente, en la Figura 10, se puede observar la representación del proceso de carga para los puntos 1 y 2.

**Figura 10**

*Representación del proceso de carga para los puntos 1 y 2 en Plaxis 2D.*



*Nota: Elaboración propia.*

**4.4 Prognosis de asentamientos de estructura fotovoltaica**

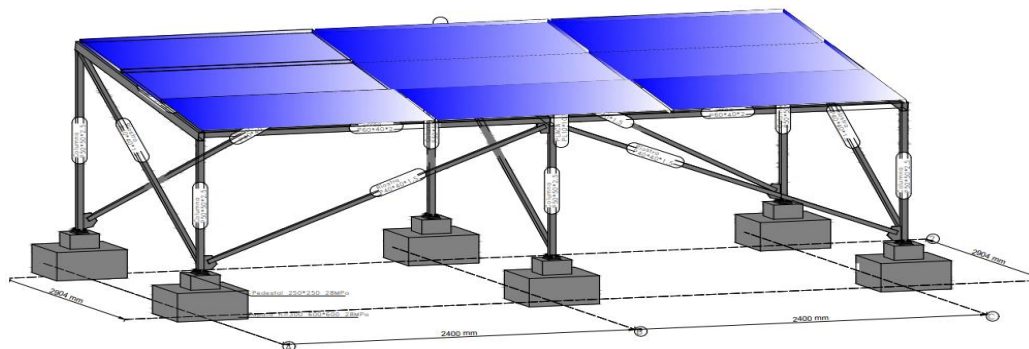
Para predecir los asentamientos producidos por la estructura fotovoltaica propuesta por Gutiérrez y Mendoza (2023), se realizó un análisis de cargas muertas y vivas con el fin de calcular el esfuerzo de apoyo correspondiente a cada zapata en contacto con el suelo del relleno sanitario. Posteriormente, la estructura fue cargada de acuerdo con los requerimientos definidos en cada programa, a continuación.

**4.4.1 Análisis de cargas**

Las cargas muertas están conformadas por la estructura de soporte metálica, los paneles solares y las zapatas. La estructura fotovoltaica representada en la Figura 11 está compuesta por: 6 paneles solares, 6 columnas de apoyo de diferente longitud, 3 vigas, 7 riostras y 8 correas. El panel solar que fue utilizado es el 335 ZXP6-LD72 de la marca ZNSHINESOLAR, cuyas dimensiones son 0,99 [m] de ancho, 1,98 [m] de alto y 0,03 [m] de espesor. Tiene potencia de 250 W, tipo de célula poli-cristalina y un peso de 25,5 kg. Los paneles tienen una inclinación de 17,5% sobre la estructura de soporte.

**Figura 11**

*Representación de la estructura fotovoltaica propuesta por Gutierrez y Mendoza.*

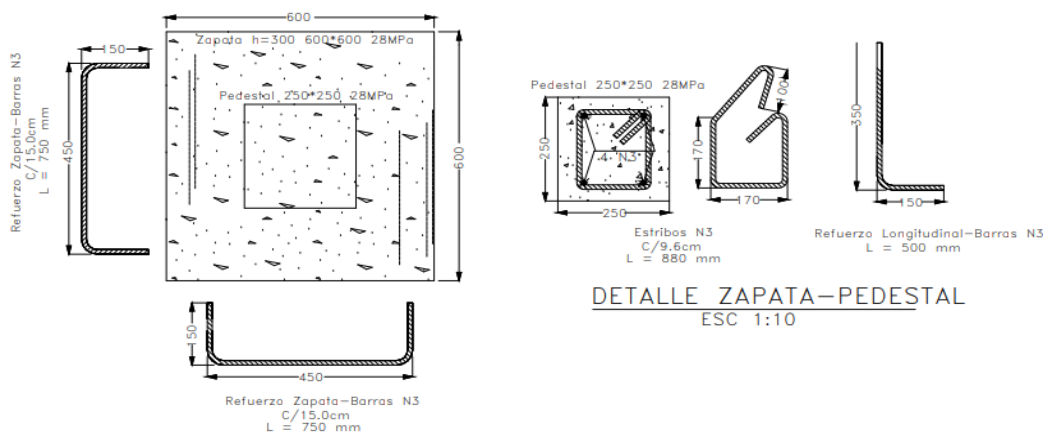


*Nota: Adaptado de Gutierrez y Mendoza (2023)*

En la Tabla 11 se detalla la longitud de los elementos estructurales, material y peso total de la estructura según el catálogo de Steckerl (Steckerlaceros, s.f). como también el peso total de los paneles solares. La estructura tiene 6 zapatas de apoyo y pedestales cuadrados de concreto de 28 MPa con recubrimiento mínimo de 75 mm y refuerzo transversal en sentido vertical y horizontal. El peso total de cada zapata aislada junto a su pedestal de concreto y refuerzo transversal detallado en la Figura 12, proveniente de los planos estructurales anexos de Gutierrez y Mendoza (2023), se encuentra en la Tabla 12. Para calcular este peso se asumió una densidad de concreto típica de 2400 kg/m<sup>3</sup>. La carga viva en este caso está conformada por las cargas temporales, las cuales están relacionadas con la construcción, uso, o mantenimiento de la estructura. Para objeto de esta investigación, se asumió como carga temporal, el mantenimiento ofrecido por un operario de 125 kg.

**Figura 12**

*Ilustración de dimensiones y refuerzo de las zapatas aisladas.*



Nota: Tomado de Gutierrez y Mendoza (2023)

**Tabla 11**

Peso de la estructura de soporte y paneles solares.

Estructura metálica de soporte				
Elemento	Perfil	Peso [kg/m]	Longitud [m]	Peso total [kg]
Columnas	PTE 50x50x2.5	3,6	10,50	37,80
Vigas	PTE 90x50x2.0	25,14	21,12	530,96
Correas	PTE 60x40x2.0	17,6	12,00	211,20
Riostras	PTE 40x40x1.5	1,88	37,90	71,25
<b>Peso total de la estructura de soporte</b>				<b>851,21</b>
Paneles solares				
Elemento	Modelo	Peso unitario [kg]	Cantidad	Peso total [kg]
Panel	ZXP6-LD72	25,5	6	153
<b>Peso total de los paneles solares</b>				<b>153</b>

Nota: Elaboración propia.

**Tabla 12**

Peso de cada zapata aislada

Elemento	Ancho [m]	Largo [m]	Espesor [m]	Peso [kg/m <sup>3</sup> ]	Recubrimiento [kg]	Peso total [kg]
Zapata	0,6	0,6	0,3	2400	0,0002	259,2002
Pedestal	0,25	0,25	0,15	2400	0,0002	22,5002
<b>Peso total de cada zapata aislada [kg]</b>						<b>281,7004</b>

Nota: Elaboración propia.

#### 4.4.2 Proceso de carga de la estructura

Para evaluar el escenario más crítico de asentamiento, fue seleccionado el punto en el cual se dieron mayores asentamientos después de la etapa de calibración, en este caso el punto 1. La carga total aplicada en el suelo se detalla en la Tabla 13, como la suma de carga muerta y viva. La gravedad fue asumida como 9,81 [m/s<sup>2</sup>]. La carga total fue repartida en 6 zapatas de dimensiones 0,6x0,6 [m] con una separación de 2,304 [m] entre ellas. Es decir, cada zapata soportó un esfuerzo de contacto de 0,0128 MPa en cada software.

**Tabla 13**

*Peso de cada zapata aislada*

Elemento	Carga muerta		Zapatas aisladas	Carga accidental	Total
	Estructura metálica	Paneles solares		Personal	
<b>Peso [kg]</b>	851,21	153,00	1690,20	125,00	2819,41
<b>Carga[kN]</b>	8,35	1,50	16,58	1,23	27,66

*Nota: Elaboración propia.*

**4.4.2.1 Prognosis de asentamientos mediante Codebright.** El intervalo de análisis fue de 20 años o 1.051\*10<sup>7</sup> minutos. Fueron conservados los intervalos anteriores de carga para no afectar el modelo calibrado, sin embargo, fueron eliminadas las cargas asignadas en cada intervalo y sustituidas por aquellas aportadas por la estructura. De igual forma, la geometría y superficies fueron conservadas.

**4.4.2.2 Prognosis de asentamientos mediante Plaxis 2D.** El intervalo de tiempo para el análisis fue de 20 años o 175200 horas. La interfaz fue modelada con un valor de  $R_{inter} = 1$ . Las propiedades mecánicas del plato que simula las zapatas aparecen en la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Peso de cada zapata aislada*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Material	-	Elastico	-
Rigidez axial	EA1	1,49E+07	KN/m
Rigidez a flexión	EI	5,60E+04	KN m <sup>2</sup> /m
Módulo de Poisson	v	0,2	-

*Nota: Elaboración propia.*

El análisis de permeabilidad se realizó en estado “Drained” o drenado, ya que el tiempo estimado de asentamiento total y la carga modelada en este caso, permite la migración de agua del entre las partículas del suelo. Por ello, fue necesario calcular la permeabilidad “x” y “y” para cada estrato utilizando la ecuación (10).

$$K_{x,y} = \frac{k * k_{rl}}{\mu l} * \gamma_w$$

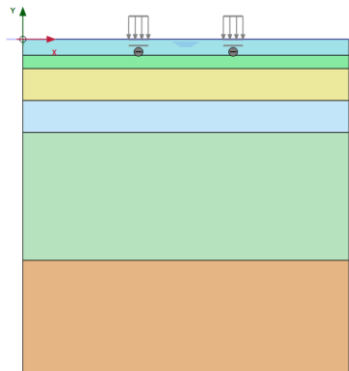
Donde:

- $k$  : Conductividad hidráulica
- $k_{rl}$  : Permeabilidad relativa al líquido
- $\mu l$ : Viscosidad dinámica del lixiviado.
- $\gamma_w$ : Densidad del agua.

Finalmente, en la Tabla 15, se muestran el número de fases definidas en el programa junto a los tipos de cálculo seleccionados para el proceso de carga de la estructura. La geometría del modelo en Plaxis 2D puede ser observada en la Figura 13.

### Figura 13

*Geometría de simulación de asentamientos de la estructura fotovoltaica*



*Nota: Elaboración propia.*

**Tabla 15**

*Fases de carga de la estructura y su tipo de análisis*

Fase	Nombre	Calculation type	Loading type	Pore pressure Calculation type	Reset displacements to zero
1	Acondicionamiento	K0 procedure	Staged construction	Phreatic	Yes
2	Activación de estructuras	Plastic	Staged construction	Phreatic	Yes
3	Asentamiento	Plastic	Staged construction	Phreatic	No

*Nota: Elaboración propia.*

#### 4.5. Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para los parámetros utilizados en la evaluación de asentamientos del relleno sanitario. Este análisis se realizó para estudiar la sensibilidad de los modelos numéricos a la variación en los parámetros de entrada sobre el asentamiento del relleno. Estos parámetros de entrada cambiarán de acuerdo con el software de elementos finitos.

##### 4.5.1 Análisis de sensibilidad en Codebright

Dado que se tomó en cuenta los modelos numéricos realizados por Becerra y Leal (2023), se analizó la variabilidad del asentamiento de la estructura fotovoltaica, a partir del cambio de

propiedades hidromecánicas en el suelo. Para ello se realizaron 2 simulaciones numéricas adicionales, en las cuales se aumenta y disminuye la permeabilidad intrínseca para el punto 1.

#### 4.5.2 Análisis de sensibilidad en Plaxis 2D

En el caso de Plaxis 2D, el análisis de sensibilidad se desarrolló de forma paralela con la calibración de los modelos, por lo cual, los parámetros de entrada, en este caso son: Cohesión, ángulo de fricción interno, OCR, coeficiente de compresión primario coeficiente de re-compresión y coeficiente de compresión secundario, Este análisis se desarrolló en el punto 1.

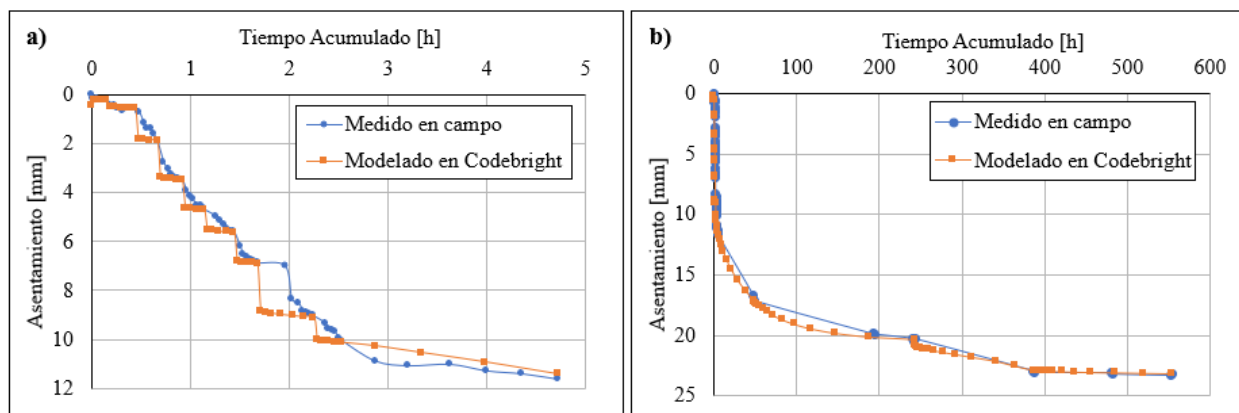
### 5. Resultados

#### 5.1 Calibración de modelos numéricos en Codebright

En las Figuras 14 y 15 se puede observar el asentamiento medido en campo y el modelado en Codebright de los puntos 1 y 2, después del ajuste del modelo elástico para: (a) el primer día de mediciones y (b) el tiempo total de medición.

#### Figura 14

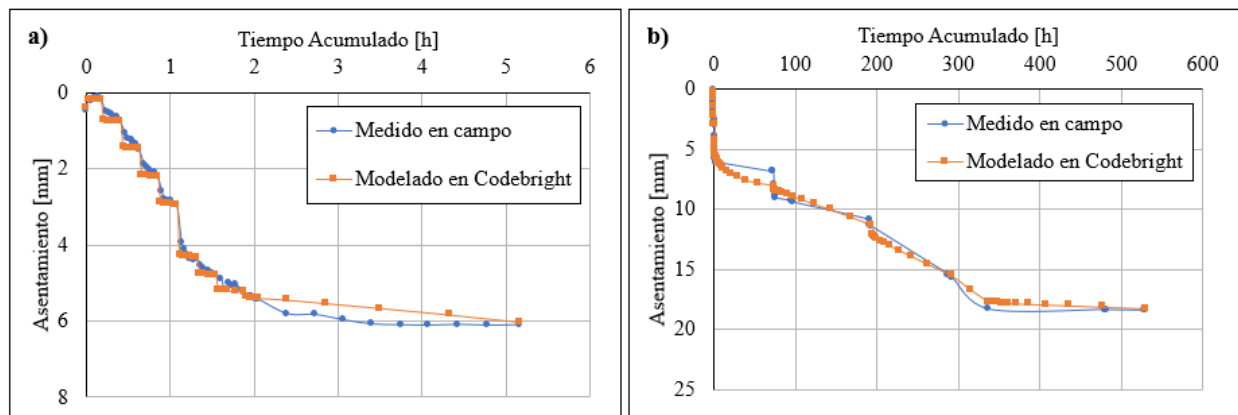
*Comparación de asentamientos medidos en campo y modelados en Codebright a partir del modelo elástico en el punto 1.*



*Nota: Asentamientos medidos en (a) el primer día y (b) el tiempo total de medición. Elaboración propia.*

### Figura 15

*Comparación de asentamientos medidos en campo y modelados en Codebright a partir del modelo elástico en el punto 2.*



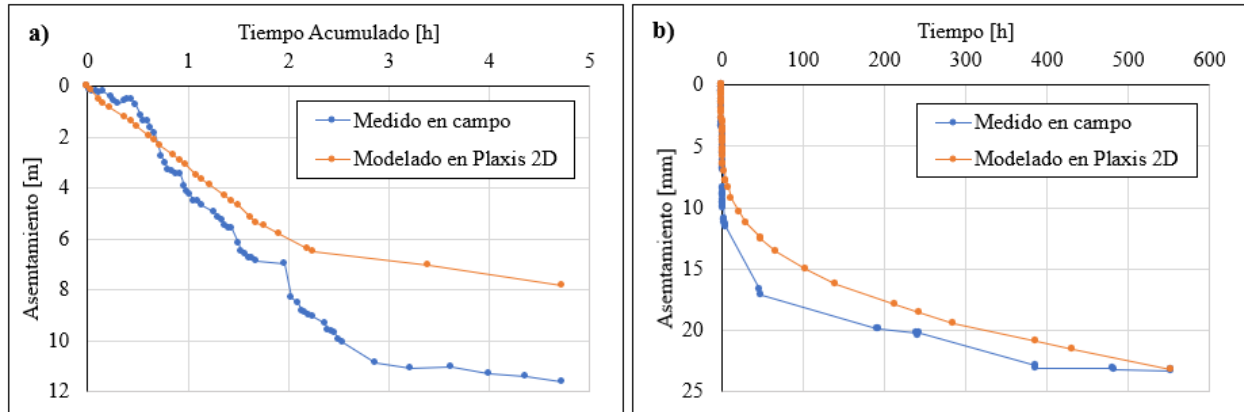
*Nota: Asentamientos medidos en (a) el primer día y (b) el tiempo total de medición. Elaboración propia.*

### 5.2 Calibración de modelos numéricos en Plaxis 2D

En las Figuras 16 y 17 se puede observar el asentamiento medido en campo y el modelado en Plaxis 2D de los puntos 1 y 2, después del ajuste del modelo SSC para: (a) el primer día de mediciones y (b) el tiempo total de medición. En el asentamiento a largo plazo se tuvo en cuenta la influencia de la permeabilidad dado que existe el tiempo necesario para la migración del agua entre partículas del suelo arcilloso, de acuerdo con el esfuerzo de contacto de las zapatas de la estructura.

**Figura 16**

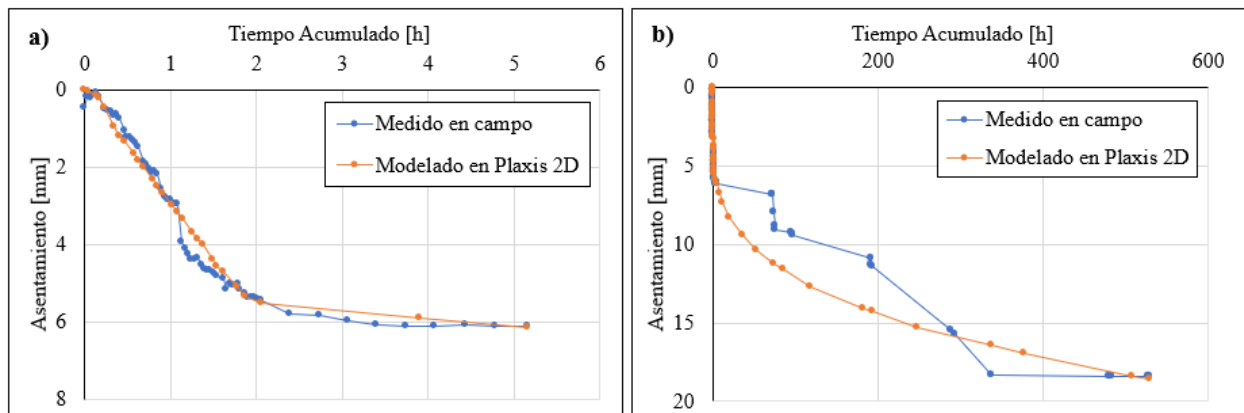
*Comparación de asentamientos medidos en campo y modelados en Plaxis 2D a partir del modelo SSC en el punto 1.*



*Nota: Asentamientos medidos en (a) el primer día y (b) el tiempo total de medición. Elaboración propia.*

**Figura 17**

*Comparación de asentamientos medidos en campo y modelados en Plaxis 2D a partir del modelo SSC en el punto 2.*



*Nota: Asentamientos medidos en (a) el primer día y (b) el tiempo total de medición. Elaboración propia.*

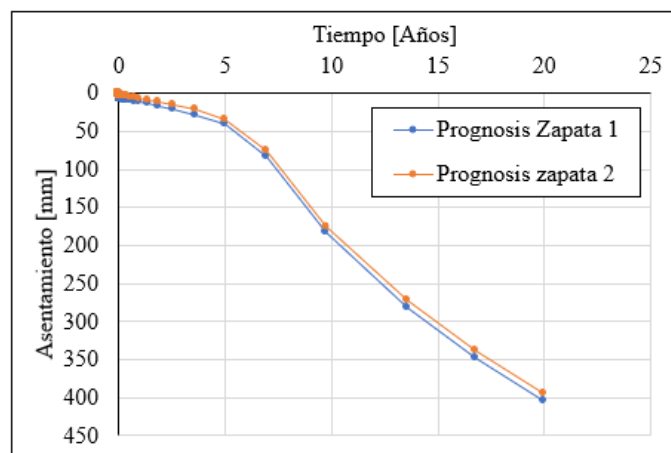
La diferencia de asentamientos en la calibración de cada programa se atribuye a la facilidad de entrada de datos en cada uno. En el caso de Codebright, las propiedades del suelo fueron modificadas a partir de cada intervalo de carga. En el caso de Plaxis 2D esto no es posible, por lo que el ajuste fue iterado hasta encontrar un comportamiento de suelo similar al real.

### 5.3 Prognosis de asentamientos en Codebright

En Codebright, la zapata 1 tuvo un asentamiento total de aproximadamente 403,85 [mm], mientras que la zapata 2 de 393,90 [mm]. En la Figura 18 se puede observar la comparación de asentamientos de las zapatas 1 y 2 de la estructura fotovoltaica, modelados en Codebright en el punto 1 para un tiempo de predicción de 20 años.

#### Figura 18

*Comparación de asentamientos modelados en Codebright de las zapatas 1 y 2 a partir del modelo viscoelástico en el punto 1.*



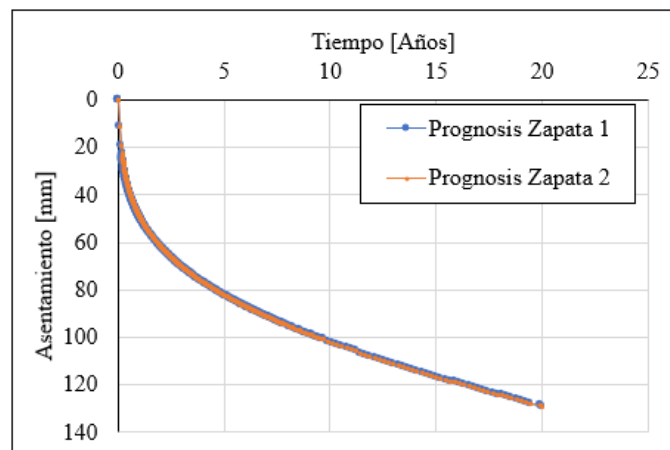
*Nota: Elaboración propia.*

#### 5.4 Prognosis de asentamientos en Plaxis 2D

En Plaxis 2D, la zapata 1 tuvo un asentamiento total de 129, 033 [mm], mientras que la zapata 2 de 129,35 [mm]. En la Figura 19 se puede observar la comparación de asentamientos de las zapatas 1 y 2 de la estructura fotovoltaica, modelados en Plaxis 2D en el punto 1 para un tiempo de predicción de 20 años.

#### Figura 19

*Comparación de asentamientos modelados en Plaxis 2D de las zapatas 1 y 2 a partir del modelo SSC en el punto 1.*



*Nota: Elaboración propia.*

Como se puede observar en las Figuras 18 y 19 el asentamiento máximo de las zapatas 1 y 2 no se estabiliza en el tiempo, por lo que se espera asentamientos mayores después de 20 años.

#### 5.5 Análisis de sensibilidad

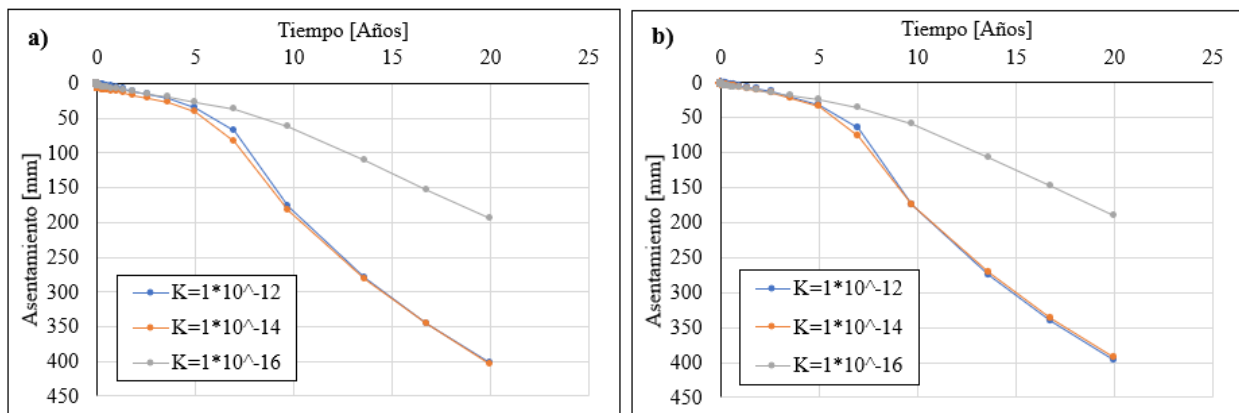
##### 5.5.1 Análisis de sensibilidad en Codebright

La Figura 20 se pueden observar los asentamientos totales de las zapatas 1 (a) y 2 (b) a la variación de permeabilidad. Se puede notar que la permeabilidad intrínseca tiende a ser

inversamente proporcional al asentamiento. De igual forma, se puede observar que tuvo una mayor sensibilidad al aumento de la permeabilidad que a la disminución de esta.

### Figura 20

*Asentamiento de las zapatas variando permeabilidad intrínseca en Codebright.*



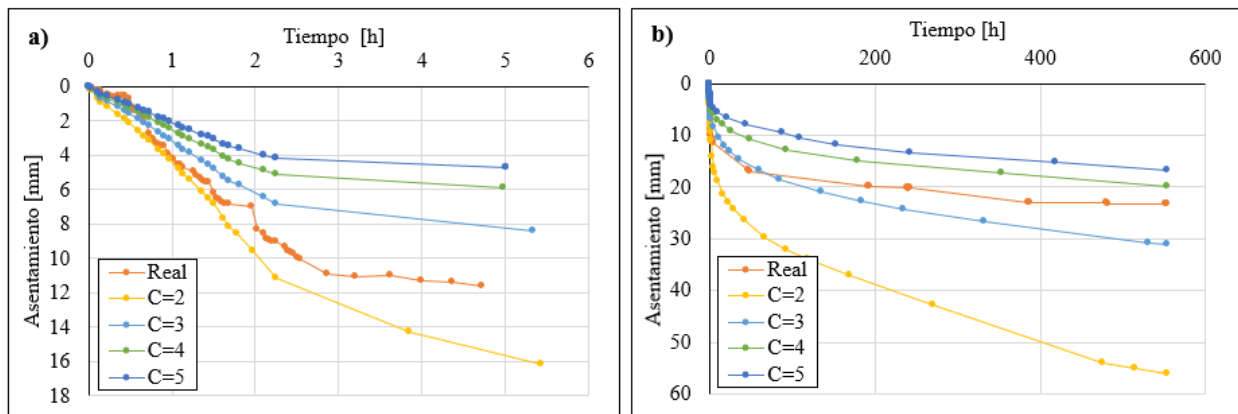
*Nota: Asentamientos de: (a) Zapata 1 y (b) Zapata 2. Elaboración propia.*

### 5.5.2 Análisis de sensibilidad en Plaxis 2D

Las Figuras 21, 22, 23, 24, 25 y 26 muestran el asentamiento en el día 1 (a) y total (b) en el punto 1 como función del tiempo. En el caso de la Figura 21, se puede observar que hay una influencia indirecta de la cohesión, ya que la cohesión está asociada a las condiciones de falla del material, por ende, a menor cohesión más puntos presentan condición de deformaciones permanentes y por tanto se incrementa el asentamiento.

### Figura 21

*Asentamientos en el punto 1 variando cohesión en Plaxis 2D.*

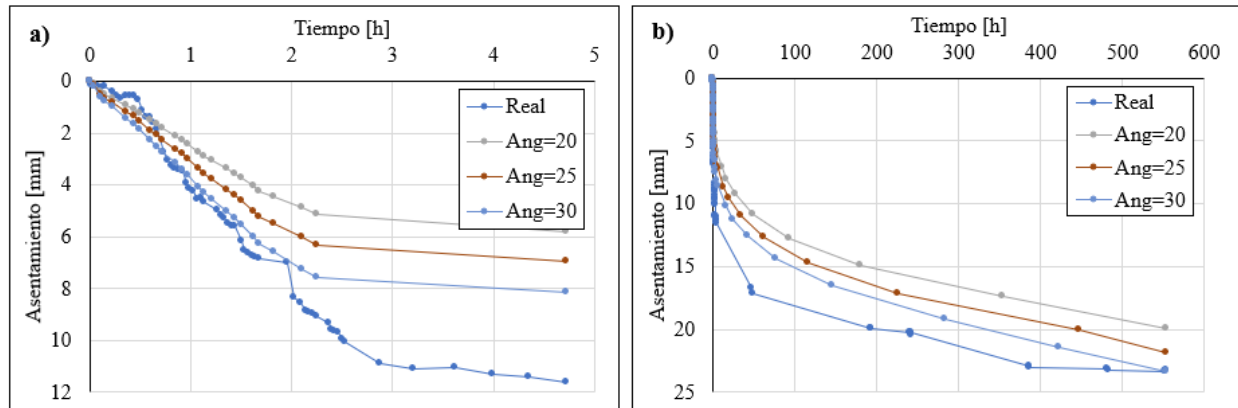


Nota: Asentamientos en: (a) Día 1 y (b) Tiempo total. Elaboración propia.

En el caso de la Figura 22, se puede observar que el ángulo de fricción interna en este estudio fue directamente proporcional al asentamiento.

**Figura 22**

Asentamientos en el punto 1 variando ángulo de fricción en Plaxis 2D.

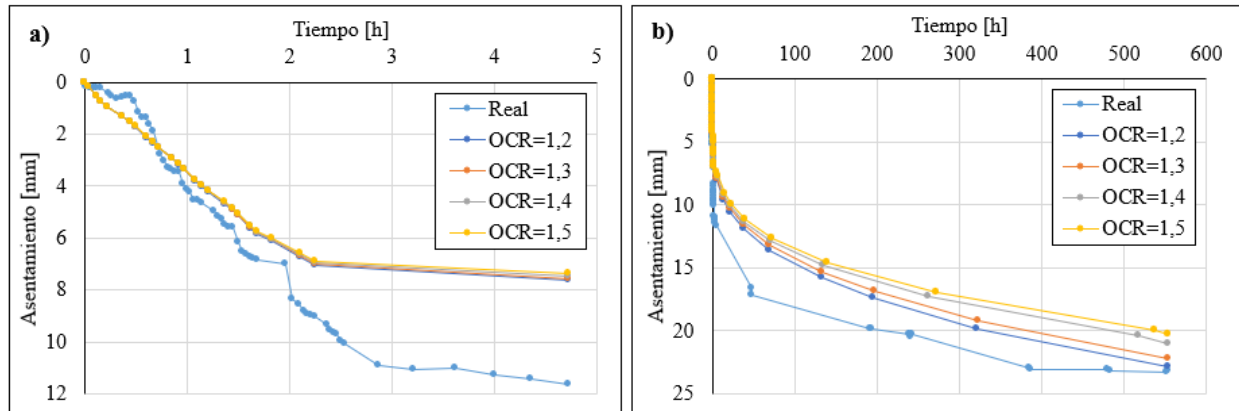


Nota: Asentamientos en: (a) Día 1 y (b) Tiempo total. Elaboración propia.

Por su parte, en la Figura 23 se puede observar que el OCR no influyó significativamente en el asentamiento del primer día, más sí en el total. Además, en este estudio fue inversamente proporcional al asentamiento.

**Figura 23**

*Asentamientos en el punto 1 variando OCR en Plaxis 2D.*

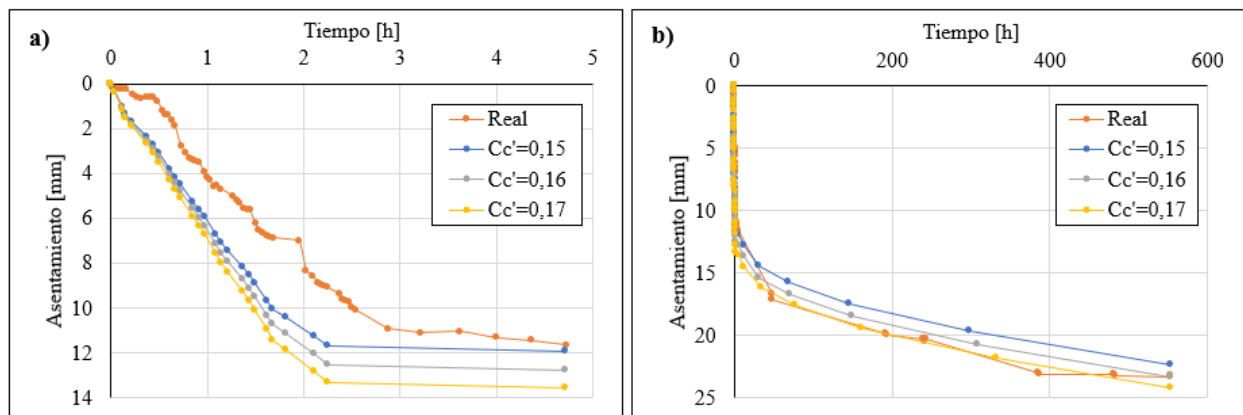


*Nota: Asentamientos en: (a) Día 1 y (b) Tiempo total. Elaboración propia.*

Adicionalmente, de acuerdo con los resultados mostrados en las Figura 24, ( $C_c$ ) o ( $C_c'$ ) fue directamente proporcional al asentamiento. El coeficiente de compresión primaria fue modificado a partir del coeficiente de compresión modificado, por ello, la variación fue realizada a partir del segundo.

**Figura 24**

*Asentamientos en el punto 1 variando  $C_c'$  en Plaxis 2D.*

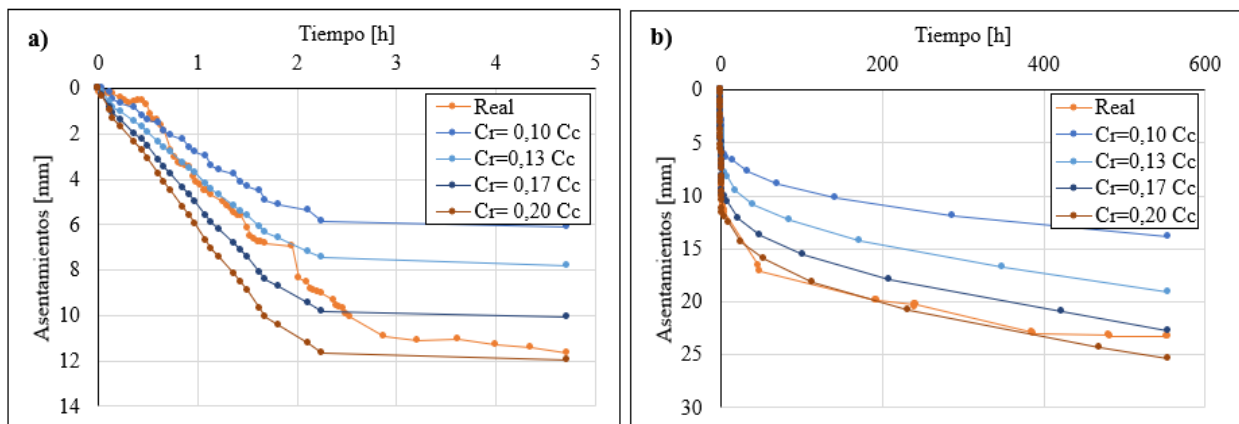


*Nota: Asentamientos en: (a) Día 1 y (b) Tiempo total. Elaboración propia.*

En el caso de la Figura 25, se puede observar que  $C_r$  es directamente proporcional al asentamiento.

### Figura 25

*Asentamientos en el punto 1 variando  $C_r$  en Plaxis 2D.*

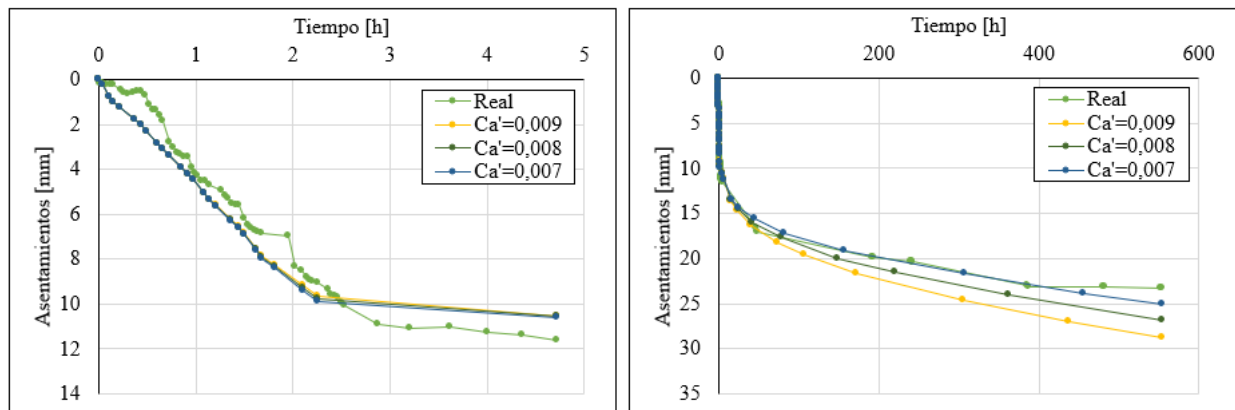


*Nota: Asentamientos en: (a) Día 1 y (b) Tiempo total. Elaboración propia.*

Finalmente, en la Figura 26 se puede observar que  $C_\alpha$  o  $C_\alpha'$  no tiene una gran influencia en el asentamiento primario, más si en el secundario. Además, de acuerdo con este estudio fue inversamente proporcional al asentamiento secundario. De igual forma, el coeficiente de compresión secundaria fue modificado a partir del coeficiente de compresión secundaria modificado, por ello, la variación fue realizada a partir del segundo.

### Figura 26

*Asentamientos en el punto 1 variando  $C_\alpha'$  en Plaxis 2D.*



*Nota: Asentamientos en: (a) Día 1 y (b) Tiempo total. Elaboración propia.*

## 6. Conclusiones

En este proyecto de investigación se realizó una revisión detallada de la literatura relacionada con la evaluación de los asentamientos en rellenos sanitarios. A partir de esta revisión se establecieron dos posibles escenarios de análisis mediante los programas PLAXIS 2D con el modelo constitutivo Soft Soil Creep y Codebright utilizando un modelo constitutivo viscoelástico. Si bien es cierto, que existen modelos más complejos en la literatura científica, estos dos modelos permiten ajustar un número de variables aceptables para el desarrollo de la fase de calibración a partir de los datos tomados en campo en un periodo de aproximadamente 23 días.

En los programas de computador seleccionados, se realizaron procesos de calibración de los asentamientos medidos en campo, mediante un proceso iterativo de las variables de entrada involucradas dentro del análisis. Por tanto, se obtuvieron parámetros de entrada para el modelo viscoelástico y soft soil creep model que ofrecen en conjunto una respuesta consistente con las observaciones.

Dentro de las ventajas y desventajas de cada programa se puede encontrar que: El software Plaxis 2D, considera de manera precisa la verdadera geometría del problema, así como la compleja

interacción entre las estructuras y el suelo, incluyendo la estratificación del terreno. Este enfoque posibilita la mejora de los diseños de proyectos y la gestión de los costos relacionados, siempre y cuando se cuente con información apropiada sobre las condiciones del terreno. Por otro lado, Codebright, considera la geometría del problema, sin embargo, no representa la interacción entre el suelo, por lo que puede subestimar o sobreestimar las deformaciones del suelo a lo largo del tiempo.

De forma paralela, Codebright tiene ventaja sobre Plaxis 2D ya que acopla el modelo hidromecánico de manera estricta. En la deformación del suelo, existen cambios en la presión de fluido, que afectan los esfuerzos efectivos, los que a su vez generan cambios en la porosidad y las deformaciones, en este punto, Codebright actualiza la permeabilidad y los cambios de porosidad, los que causan nuevamente un cambio en la presión de fluido y, por ende, de la deformación nuevamente. De forma contraria, Plaxis 2D no actualiza la permeabilidad y los cambios de porosidad, por lo que no es capaz de actualizar nuevamente la presión de fluido en cada intervalo de tiempo como un parámetro que varía constantemente.

Finalmente, el modelo constitutivo viscoelástico de Codebright tiene una limitación al no considerar de manera estricta la historia de esfuerzos del material, mientras que Plaxis 2D tiene acoplada esta función.

Según los resultados, los modelos numéricos de Codebright y Plaxis no logran estabilizarse en 20 años, por lo que se esperan asentamientos mayores pasado el tiempo de pronosis. Además, el modelo numérico en Codebright presenta asentamientos de orden mayor que en Plaxis 2D. Las diferencias en los resultados de asentamiento obtenidas a partir del análisis de cada software pueden ser atribuidas a las diferencias mencionadas anteriormente, como también a las

propiedades asumidas y definidas en cada uno de ellos. Se debe tener en cuenta que el número de propiedades calibradas en Plaxis 2D es mayor, por lo que genera una mayor incertidumbre al momento de realizar este proceso.

A partir del análisis de sensibilidad realizado en Plaxis 2D se puede concluir que los parámetros o factores internos que influyen en ambos procesos de asentamiento (Primario y secundario) son cohesión, ángulo de fricción, coeficiente de compresión primaria y coeficiente de re-compresión. De forma exclusiva, los parámetros o factores internos más influyentes en el proceso de consolidación secundaria son el OCR, y el coeficiente de compresión secundaria. A partir del análisis de sensibilidad realizado en Codebright se puede concluir que el modelo tuvo mayor sensibilidad al aumento de permeabilidad. Adicionalmente, la permeabilidad es inversamente proporcional al asentamiento.

## **7. Recomendaciones**

Para objeto de este estudio, se tuvieron en cuenta valores de parámetros obtenidos a partir de la literatura, por lo que se recomienda continuar con la toma de datos en campo para lograr una óptima caracterización del suelo del relleno sanitario y, en consecuencia, un mejor ajuste de los parámetros de calibración.

Por último, se recomienda el uso del método de elementos finitos para futuros análisis de asentamientos en estructuras fotovoltaicas, debido a su precisión, capacidad para tener en cuenta una amplia gama de parámetros y su flexibilidad para abordar diversos problemas. Además, la combinación de Plaxis 2D y Codebright permite obtener una comprensión más completa y detallada de cada problema específico, lo que resulta de gran utilidad para optimizar soluciones y detectar posibles problemas de diseño.

### Referencias Bibliográficas

- 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, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS. (2009). Versión Preliminar, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Comité AIS-100, Subcomité Concreto Estructural – Bogotá D. C.
- Auto 07715. (2018). Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.
- Basha, B. M., Parakalla, N., & Reddy, K. R. (2016). Experimental and statistical evaluation of compressibility of fresh and landfilled municipal solid waste under elevated moisture contents. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10(1), 86-98.
- Becerra, H. & Leal, O. (2023). *Determinación de asentamientos en el relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga*. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Cascarano, M. Á. (2022, marzo 20). ¿Qué es un parque fotovoltaico y cómo funciona? Meeeco. <https://es.meeeco.net/parque-fotovoltaico/>
- Decreto 838 de 2005 [Ministerio de Ambiente, Vivienda, y Desarrollo Territorial]. Por medio del cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Marzo 23 de 2005.
- Decreto 2981 de 2013 [Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio]. Por medio del cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo. Diciembre 20 del 2013

- 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 pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Firgi, T., & Telekes, G. (2016). Modelling the Deformation of a MSW Landfill Based on Tests. *Procedia engineering*, 161, 318-323.
- Franco Antolínez, L. J., Meza Joya, M. A., & Almeida, 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 Ingeniería*, 15(1), 180–193.
- Google Earth. (2023). Google. <https://earth.google.com/web/>
- Gutiérrez, B., Mendoza O. (2023). *Evaluación de los desplazamientos por carga gravitacional en estructuras de soporte de un sistema de generación de energía fotovoltaica ubicadas en el relleno sanitario: El Carrasco*. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2023.
- Índice de recompresión. (s/f). Finesoftware.es. Obtenido de <https://www.finesoftware.es/ayuda-en-linea/geo5/es/indice-de-recompresion-01/>
- Ivanova, L. K., Richards, D. J., & Smallman, D. J. (2008, August). The long-term settlement of landfill waste. In *Proceedings of the institution of civil engineers-waste and resource management* (Vol. 161, No. 3, pp. 121-133). Thomas Telford Ltd.
- Jiang, L. (2015). *Estudio THM en el proceso de compactación de una escombrera de residuos de sal* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

- Mora, J. (2019). *Aproximación a los problemas ambientales que se presentan en el relleno sanitario “El Carrasco, en Bucaramanga”*. Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Olivella, S., Gens, A. et al. (1996). Numerical Formulation for a Simulator (CODE\_BRIGHT) for the Coupled Analysis of Saline Media. *Engineering Computations*, Vol. 13, n° 7, pp: 87-11. <https://doi.org/10.1108/02644409610151575>.
- Omari, A. (2012). Slope stability analysis of industrial solid waste landfills.
- Operativa, D. (2022). Aprovechamiento y disposición de residuos. EMAB | Empresa de aseo de Bucaramanga S.A E.S.P; EMAB. <https://emab.gov.co/aprovechamiento-y-disposicion-de-residuos/>
- Plaxis 2D. (2023). Material Models Manual 2D. 1-133.
- Powrie, W., Xu, X. B., Richards, D., Zhan, L. T., & Chen, Y. M. (2019). Mechanisms of settlement in municipal solid waste landfills. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 20(12), 927-947.
- Remez, N. S., & Osipova, T. A. (2016). Prediction of strain state of landfill considering soil foundation and angle of slope. *Odes' kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*, (2 (49)), 40-46.
- Ren, Y., Zhang, Z. y 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>.
- Resolución 00520. (2018). *Autoridad Nacional de Licencias Ambientales*. Bucaramanga.

- Rincón Camazano, P. (2018). *Back-analysis de un estudio THM del proceso de compactación de una escombrera de residuos de sal a partir de datos reales*. (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Rivera, I. (2012). *Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios*. Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Steckerlaceros (s.f). Tubería de acero estructural. Obtenido de [https://steckerlaceros.com/wp-content/uploads/2020/12/2015\\_Catalogo\\_Productos\\_III-Edicion.pdf](https://steckerlaceros.com/wp-content/uploads/2020/12/2015_Catalogo_Productos_III-Edicion.pdf)
- Tejedor, L. A. (2014). Comportamiento triaxial consolidado y sin drenaje de la Marga Azul del Guadalquivir con modelos elastoplásticos y elementos finitos axilsimétricos. Trabajo de grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla.
- Torrado G, L. M. & Rondón, J. A. (s.f). *INGEASSAS*. Obtenido de <https://www.ingeassas.com/diapositivas/RELLENOS-SANITARIOS-CASO-CARRASCO.pdf>
- Yepes, J. (2015). *Ajuste de un modelo para estimar asentamientos en el relleno sanitario La Pradera*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

## Apéndices

### Apéndice A. Estado del arte

Revisión bibliográfica de modelos matemáticos y numéricos de predicción de asentamientos en Rellenos Sanitarios clausurados, no clausurados o en diseño.

Artículo	Autor	Localización	Estado	Resumen	Modelos utilizados	Conclusiones
Estimation of Landfill Settlement Using Different Models. In Advances in Geo-Science and Geo-Structures (2022)	Aman, C. A., Kumari, S., & Ghani, S.	Estudio realizado en "National Institute of Technology Patna" India	Diseño	Realizaron la predicción de asentamientos en un relleno sanitario a través de modelos de predicción numérica para un periodo de 30 años. Finalmente realizaron un estudio comparativo de los resultados obtenidos a partir de cada modelo para conocer la confiabilidad y limitaciones de cada uno de ellos	Sowers (1973) Bjarngard and Edgers (1990) Hossain and Gabr (2005) Edil et al (1990) Ling et al (1998) Gibson and Lo (1961) Marques (2001)	El modelo de Marques (2001) considera consideraba todos los componentes de asentamiento de residuos en el relleno sanitario (Compresión primaria, mecánica secundaria y biológica secundaria) , por lo que el asentamiento teórico calculado a partir de este modelo es cercano al real.
Influence of waste temperatures on long-term landfill performance: Coupled numerical modeling. (2021)	Kumar, G., Kopp, K. B., Reddy, K. R., Hanson, J. L., & Yeşiller, N.	NA	Diseño	Desarrollaron un modelo termo-hidro-biomecánico acoplado (CTHBM) para simular el comportamiento a largo plazo de RSU a largo plazo, teniendo en cuenta la temperatura. Además, evaluaron la influencia de la temperatura en el asentamiento y la inyección de lixiviados.	CTHBM Model Thermal model Biodegradation model	La temperatura y humedad afectan directamente la tasa de degradación, por lo que, a mayor tasa de degradación, menor tiempo de estabilización. La inyección de lixiviados disminuye el tiempo de estabilización de asentamiento de los residuos, mientras que tener en cuenta la temperatura permite una prognosis óptima de asentamientos.
Modeling elasto-visco-bio-plastic mechanical behavior of municipal solid waste in landfills. Acta Geotechnica, 16(4), 1061-1081. (2021)	Kumar, G., Reddy, K. R., & Foster, C.	NA	Diseño	Desarrollaron de un modelo mecánico que explica el efecto de las tensiones de sobrecarga inducidas por la carga, el comportamiento de compresión por fluencia dependiente del tiempo y la tensión inducida por biodegradación en la predicción de asentamientos de desechos en rellenos sanitarios. Evaluar el efecto de la inyección de lixiviados	CTHBM Model	El modelo captura la tendencia de asentamiento de las muestras de desechos. Gran concordancia con los datos experimentales para el asentamiento inducido por carga a corto y largo plazo y el asentamiento inducido por biodegradación y su fluencia. La inyección de lixiviados tiene mayor influencia en el asentamiento visco-bioplástico que en el viscoplástico a largo plazo. De igual forma la inyección de lixiviados mejora la sedimentación de residuos.

Performance comparison of a MSW settlement prediction model in Tehran landfill. (2020)	Tahmoorian, F., & Khabbaz, H.	Relleno sanitario de Teherán. Irán	Clausurado	Desarrollaron una herramienta geotécnica para predicción de asentamientos de rellenos sanitarios cerrados utilizando la interfaz de usuario MATLAB y un modelo matemático para el cálculo. Finalmente realizaron un análisis de sensibilidad para determinar las propiedades más significativas en el asentamiento del relleno sanitario.	Hettiarachchi (2005)	El modelo logró capturar la naturaleza de asentamiento a largo plazo. Los parámetros más influyentes en el asentamiento fueron: Altura y parámetros de compresibilidad. De igual forma determinaron que no influye la humedad dado que es menor a 40%.
Comparison of settlement behaviors of high-food-waste-content (HFWC) and low-food-waste-content (LFWC) MSWs and assessment of their prediction models. (2019)	Xu, H., Qiu, H., Zhu, G., Zhan, L., Zhang, Z., Xu, X., ... & Wang, Y.	Rellenos sanitarios con HFWC por ejemplo (China) y rellenos sanitarios con LFWC (EEUU)	NA	Caracterizaron y compararon los asentamientos de desechos sólidos municipales (MSW) con alto (HFWC) y bajo (LFWC) contenido de desechos alimentarios de países en desarrollo, como China y países desarrollados como EE. UU. Para ello, buscaron comprender los mecanismos de compresión de cada relleno sanitario y evaluar el rendimiento y aplicabilidad de nueve modelos de predicción de asentamiento en función de conjuntos de datos experimentales de referencia.	Sowers (1973) Yen and Scalon (1975) Edil et al (1990) Ling et al (1998) Marques et al (2003) Machado et al (2009) Gourc et al (2010) Chen et al (2010) Gao et al (2017)	Los MSW con HFWC tienen un mayor contenido de humedad que los MSW con LFWC. Además, los MSW frescos con HFWC generalmente tienen una compresión primaria (C <sub>c</sub> ) mayor en comparación con los MSW con LFWC, diferencia que se atribuye a la liberación de una gran cantidad de agua intra-partícula contenida en los residuos de alimentos bajo esfuerzos adicionales. De forma contraria, cuando los MSW-HFWC y MSW-LFWC están envejecidos el índice de compresión para ambos casos es igual. El asentamiento a corto plazo puede ser calculado a partir del modelo de Sowers (1973) mientras que el asentamiento a largo plazo se sugiere ser calculado con el modelo de Marques et al (2003)
Model Uncertainties in Long-Term Settlement Prediction of Landfill Waste. In The International Congress on Environmental Geotechnics (2018)	Xie, Y., Xue, J., & Gnanendran, C. T.	Bandeirantes, Brasil.	NA	Evaluaron las incertidumbres de los modelos de predicción de asentamiento a largo plazo de los rellenos sanitarios mediante modelos de predicción matemáticos.	Gibson et al (1961) Marques (2001) Oweis y Khera (1986) Bjarngard and Edgers (1990) Hossain y Gabr (2005) Park and Lee (1997) Sowers (1973) Ling et al (1998) Hettiarachchi et al (2009); (2005)	La variabilidad de los parámetros no tiene gran influencia en el asentamiento a corto plazo, mientras que en el asentamiento a largo plazo sí influye en gran medida gracias a la etapa de degradación de los residuos. Finalmente concluyeron que existe un grado de incertidumbre en el asentamiento del relleno sanitario de acuerdo con los valores definidos para cada parámetro en cada modelo, es por ello que los autores sugirieron que se tenga en cuenta un método basado en la probabilidad para la predicción de asentamientos a largo plazo.
Risk assessment predictions of open dumping area after closure using Monte Carlo simulation (2017)	Pauzi, N. I. M., Radhi, M. S. M., & Omar, H	Kuala Lumpur, Seri Kembangan	Clausurado	Evaluaron el riesgo de asentamiento de un área de relleno sanitario clausurada en Kuala Lumpur, Malasia, a través de cinco modelos de predicción de asentamiento y la simulación de Monte Carlo,	Modelo (SMBM) Bjarngard and Edgers (1990) Power creep function model Hyperbolic function Modelo reológico	El modelo de SMBM proporcionó la estimación más precisa y conservadora de asentamiento en el área del relleno, en comparación con los otros modelos. De acuerdo con el riesgo de asentamiento, el asentamiento primario no es potencial para remediar, mientras que en el asentamiento secundario debe realizarse un trabajo de remediación.

Long-term settlement prediction at open dumping area using Hossein and Gabr method for new development (2017)	Pauzi, N. I. M., Shariffuddin, A. S., Omar, H., & Misran, H	Bukit Palon, Lukut, Malasia	Clausurado	Calcularon el asentamiento a largo plazo en el relleno sanitario para proponer tipos de cimentaciones adecuadas para la reutilización de este suelo y el desarrollo del área.	Hossain and Gabr (2005)	Los valores estuvieron debajo del asentamiento máximo propuesto, por lo cual concluyeron que es aceptable darle un nuevo uso al suelo a través de cimientos profundos o superficiales en función del asentamiento previsto.
Aplicação de Modelos Matemáticos para Previsão de Recalques do Aterro de Nova Iguaçu – RJ, Brasil. Anuário do Instituto de Geociências (2021)	Klink, A.F.C.; Elk, A.G.H.P.; & Silva, J.C.	Rio de Janeiro Brazil	Área clausurada: Valle III cerrada en 2014	Compararon el asentamiento a largo plazo de un relleno sanitario predicho mediante modelos matemáticos. Los modelos fueron calibrados a partir de los asentamientos reales.	Sowers (1973) Gandola et al (1994) Meruelo (Palma, 1995) Ling et al (1998) Oweis (2006)	Los modelos se ajustaron bien a corto plazo, pero a largo plazo los modelos de Gandola et al. (1994) y Oweis (2006) presentaron valores más significativos que los modelos de Sowers (1973), Ling et al. (1998) y Meruelo (1995), ya que consideran una tasa constante de descomposición en el tiempo. Se debe añadir, que identificaron que el modelo de Oweis es aquel que tuvo una mayor correlación con los datos de campo y se considera que presenta las predicciones de asentamiento más significativas.
Avaliação e previsão de recalques nos aterros sanitários de Minas do Leão e São Leopoldo, Estado do Rio Grande do Sul (2018)	Teixeira, M. C., & Pinheiro, R. J. B	Minas de León y San Leopoldo Brazil.	NA	Evaluaron los asentamientos de un relleno sanitario por medio de modelos matemáticos. Los criterios utilizados para la comparación de los modelos estuvieron sujetos a la verificación de la adhesión de los resultados obtenidos a partir de cada modelo, al asentamiento medido en campo. Es decir, los modelos que presentaron una menor desviación en la predicción del asentamiento en rellenos sanitarios fueron considerados más eficientes.	Gibson and Lo (1961) Bjarngard and Edgers (1990) Meruelo (Palma, 1995) Ling et al (1998)	Los asentamientos medidos en campo fueron menores a los estimados por los cuatro modelos mencionados anteriormente, por lo que exista una gran aproximación de los asentamientos teóricos y reales. Los modelos que lograron una mayor aproximación fueron los de Bjarngard e Edgers (1990) y Meruelo (1995) lograron una mayor aproximación al asentamiento real a largo plazo ya que: consideraron la compresión secundaria a largo plazo y la variación de la densidad de los residuos con el tiempo gracias a la descomposición de estos (A través de la teoría de la hidrólisis), respectivamente.
Statistical modeling of municipal solid waste settlement from a lysimeter (2017)	Neto, C. A., Nóbrega, B. M. A., Sousa, R. B. A., Melo, M. C., Paiva, W., & Monteiro, V. E. D.	Campina Grande, Brazil.	No clausurado.	Construyeron un modelo de regresión lineal simple para determinar el asentamiento en un lisímetro lleno de residuos urbanos del relleno sanitario en la ciudad de Campina Grande, Brazil.	Modelo de regresión lineal desarrollado en el estudio	El modelo logra capturar el asentamiento a largo plazo dado que el asentamiento medido en el lisímetro se encuentra dentro de los rangos superior e inferior del modelo continuando con una trayectoria lineal. Recomendaron finalmente la incorporación del asentamiento inicial a través de un modelo no lineal.

Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil.	Simões, G. F., & Catapreta, C. A. A.	Relleno sanitario experimental, Brazil.	NA	Comparación de tres modelos de predicción de asentamiento a largo plazo en rellenos sanitarios. Los criterios utilizados para su comparación fueron la precisión de la predicción del asentamiento a largo plazo y la capacidad de los modelos para ajustarse a los datos de campo obtenidos en un relleno experimental en Brazil durante un periodo de 6 años.	Edil et al (1990) Ling et al., 1998 Marques et al (2003)	El modelo compuesto de Marques et al. (2003) proporcionó una mayor aproximación a los resultados obtenidos en campo y una menor desviación en la predicción del asentamiento a largo plazo. En otras palabras, el modelo compuesto de Marques et al. (2003) tiene una naturaleza más completa y precisa al considerar también procesos bioquímicos en su modelo en comparación con los modelos reológicos e hiperbólicos que solo consideran procesos mecánicos.
Analysis of settlements in landfills La Pradera and Curva de Rodas (2018)	Yepes-García, J. A., & Villarraga-Herrera, M. R. (2018)	Curva de rodas y la pradera, Antioquia, Colombia	Clausurado	Ajustaron un modelo para estimar los asentamientos a través del tiempo en los residuos sólidos urbanos, involucrando variables cómo el módulo de compresibilidad mecánica y compresibilidad mecánico-biológica. Para la predicción de asentamientos utilizaron modelos matemáticos. Realizaron una comparación entre los modelos utilizados para conocer su confiabilidad y limitaciones para las condiciones específicas del sitio. Finalmente analizaron los factores de mayor influencia en el asentamiento.	Gibson et al (1961) Ling et al (1998) Marques et al (2003)	La magnitud del asentamiento predicho difiere según el modelo de predicción utilizado y los valores de los parámetros seleccionados ya que algunos modelos ignoran la compresión secundaria y la biodegradación. El modelo de Marques (2001) incorporaba los tres mecanismos de asentamiento: respuesta mecánica inmediata, deformación creep y biodegradación, por lo que el valor calculado de asentamiento total a partir de este modelo es cercano al real. Los factores de influencia fueron: contenido de materia orgánica, grado de compactación inicial, edad de los residuos, humedad, temperatura, PH, y condiciones externas.

Revisión bibliográfica de modelos numéricos para predicción de asentamientos o uso del modelo constitutivo seleccionado a través de Codebright y Plaxis 2D.

Artículo	Autor	Localización	Resumen	Modelos constitutivos	Conclusiones
<b>Code bright</b>					
<b>M. Finite-element modeling of the behavior of underground caverns excavated in rock salt. (2014)</b>	Khaledi, K., Schanz, T., & Datcheva	Bulgaria	Modelaron numéricamente el comportamiento dependiente del tiempo de cavernas subterráneas excavadas en sal de roca utilizadas para almacenar aire comprimido, gas natural, CO2 Y H2, con el fin de comparar la eficiencia y aplicabilidad de dos modelos constitutivos, estimar el comportamiento a corto plazo y la estabilidad a largo plazo la caverna.	Dislocation Creep (DC); Hou / Lux (HL)	El modelo Hou/Lux puede predecir la respuesta transitoria de la sal en la roca para condiciones de carga y descarga, así como también, se obtiene una buena descripción del comportamiento a mediano y largo plazo de la sal en la roca. El modelo DC no ofrece resultados realistas ya que es un modelo de fluencia estacionario.

<b>Back-analysis de un estudio THM del proceso de compactación de una escombrera de residuos de sal a partir de datos reales</b>	Pablo Rincón Camazano	Barcelona	Realizaron un análisis crítico del comportamiento de un residuo salado compactado debido a peso propio, con el fin de conocer su comportamiento a largo plazo y, por ende, predecir su estabilidad futura. Con el fin de conocer su comportamiento a largo plazo, el autor modeló tres geometrías tridimensionales reales de la escombrera, con diferentes modelos constitutivos: el modelo viscoplastico DC, el modelo viscoelástico FADT y el modelo THM.	Dislocation Creep (DC); Viscoelástico (FADT); Termo-hidráulico-mecánico (THM)	El modelo predominante para la predicción de deformación de material salino es el modelo FADT, ya que sus resultados concuerdan con los observados a lo largo del mismo periodo de tiempo estudiado. El modelo DC no logró explicar por sí mismo los mecanismos observados en la escombrera. El modelo THM fue idóneo para realizar la calibración, como también conocer el comportamiento térmico e hidráulico ya que es el único que lo incorpora.
<b>Analysis of the process of compaction movements of deposits of crushed salt tailings (2021)</b>	Yubero, M. T., Olivella, S., Gens, A., Bonet, E., Lloret, A., & Alfonso	Fusteret, Súria, España	Evaluaron el comportamiento del material granular de roca salina, durante los procesos de compactación y consolidación bajo su propio peso.	Dislocation Creep (DC); Viscoelástico (FADT)	La porosidad disminuye con la profundidad, de forma que la parte inferior del relave desarrolla mayores tasas de deformación por fluencia gracias a un mayor nivel de tensión y grado de saturación. El grado de saturación es mayor en el límite inferior del relave ya que el material compacto es menos permeable y retiene salmuera, de igual forma la presión de líquido se concentra en el fondo del relleno sanitario.
<b>Plaxis 2D</b>					
<b>Settlement of a railway embankment on PVD-improved Karakore soft alluvial soil (2020)</b>	Muhammed, J. J., Jayawickrama, P. W., Teferra, A., & Özer, M. A	Etiopia	Evaluaron el asentamiento de un terraplén ferroviario construido sobre un depósito de suelo aluvial mejorado con drenaje vertical prefabricado (PVD) en el área de Karakore, Etiopia. A partir de las simulaciones numéricas, realizaron un análisis comparativo entre el modelo Hardening soil, Soft soil y Soft Soil con presencia de PVD en el asentamiento en el tiempo. Finalmente realizaron un estudio de sensibilidad para establecer los factores que influyen en mayor medida en el asentamiento	Mohr Coulomb (MC); Hardening Soil (HS); Soft Soil Creep (SSC)	El modelo SSC predijo mejor el asentamiento en el tiempo, que el modelo HS. Los modelos presentan a largo plazo muestran diferencias significativas, atribuidas al factor de fluencia que se tiene en cuenta en el modelo SSC, mientras que el modelo HS no. La instalación de PVD mejoró el comportamiento de asentamiento vs tiempo, ya que provoca la aceleración de los asentamientos como también la disipación de exceso de presión de agua intersticial. Según el análisis de sensibilidad paramétrica: el índice de compresión, la relación de vacío inicial, la conductividad hidráulica y el OCR influyeron mucho en las respuestas de asentamiento del suelo de aluvión blando mejorado con PVD.
<b>(2019) The effect of impact roller compaction on closed landfill settlements</b>	Alibeikloo, M., & Isfahani, H. S.	NA	Estudiaron el efecto de aplicar el método de compactación de rodillos de impacto (ICR) en la reducción del tiempo de precarga como mejora del suelo de áreas de rellenos sanitarios clausurados y su posible reutilización.	Mohr Coulomb (MC); Soft Soil Creep (SSC)	A menor tiempo de sobrecarga de una superestructura, el asentamiento del relleno sanitario aumenta notablemente. al usar el método no intrusivo ICR, la relación de vacíos disminuye y mejoran los parámetros de asentamiento por fluencia, lo que ayuda a reducir el asentamiento a largo plazo en el método de carga. El método no es una mejora profunda eficiente, por lo que puede ser utilizado para mejorar suelos de rellenos sanitarios en los cuales se construya una estructura de carga ligera y con huellas de cimentación pequeñas

<b>Prediction Of the Development Of Long Term Deformations In Deposit Bodies (2017)</b>	Todorov, M., & Kostov, V.	Bulgaria	Predijeron y analizaron los asentamientos del relleno sanitario de cenizas volantes en Bulgaria mediante un modelo matemático y otro numérico.	Modelo de Terzagui; Soft Soil Creep (SSC); Modified Cam-Clay (MCC)	Los factores más influyentes en el asentamiento son: la densidad inicial, la relación de vacíos y la densidad seca, como también, el comportamiento de los subproductos y en menor medida, el cambio de estado de tensión-deformación de la capa base del terreno natural y la capa depositada previamente. Los asentamientos tienen comportamientos similares en ambos modelos, pero el modelo numérico a partir de Plaxis 2D calcula un mayor asentamiento primario. En cuanto al asentamiento secundario, los dos modelos tienen tendencia a estabilizarse pasado un periodo de tiempo.
<b>Prediction of strain state of landfill considering soil foundation and angle of slope. (2016)</b>	Remez, N. S., & Osipova, T. A.	Ucrania	Estudiaron la relación de las propiedades del suelo subyacente y el ángulo de pendiente del relleno sanitario, con el objetivo de definir si el suelo del relleno era óptimo para construcción.	Mohr Coulomb (MC); Soft Soil Creep (SSC)	El ángulo de inclinación del cuerpo del relleno afecta significativamente la deformación vertical. Los autores identificaron que al disminuir el ángulo de inclinación el asentamiento disminuye junto a los valores de deformación. Finalmente, los autores formularon 3 funciones de segundo grado útiles para calcular valores intermedios de ángulos de inclinación que pueden ser utilizadas para predecir el asentamiento de rellenos sanitarios y evaluar la posibilidad de reutilizar el área clausurada.
<b>Modelling the Deformation of a MSW Landfill Based on Tests (2016)</b>	Firgi, T., & Telekes, G.	South-West, Budapest	Estimaron el asentamiento en espacio y tiempo de los desechos ubicados en el relleno sanitario Puzstázamor, para la posible reutilización futura del área del terreno	Mohr Coulomb (MC); Hardening Soil (HS); Soft Soil Creep (SSC)	El modelo MC no representa asentamientos a largo plazo. El modelo HS captura la naturaleza real de los movimientos, pero deprecia la degradación de los residuos, es por ello que después de alcanzar la etapa de asentamiento primario, su asentamiento se estabiliza. El modelo SSC, logró obtener resultados similares a los de campo cuando es construido el modelo de simulación capa a capa de acuerdo con la fase de degradación a tratar.