

EVALUACIÓN DE LA CIMENTACIÓN DEL EDIFICIO DE LA ALCALDÍA DE
VILLAVICENCIO EN EL DEPARTAMENTO DEL META, COLOMBIA;
CONSIDERANDO SU INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA.



DANIEL FELIPE SÁNCHEZ RUBIO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2023

EVALUACIÓN DE LA CIMENTACIÓN DEL EDIFICIO DE LA ALCALDÍA DE
VILLAVICENCIO EN EL DEPARTAMENTO DEL META, COLOMBIA;
CONSIDERANDO SU INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA.

DANIEL FELIPE SÁNCHEZ RUBIO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Mg.. JUAN MANUEL SALGADO DIAZ, MSc.

Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Infraestructura Vial

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO

2023

Autoridades Académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P.

Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O. P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ, Mg.

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

Deseo dedicar este trabajo a la memoria de mi madre, quien sé que desde su lugar en el cielo se sentirá orgullosa de la persona en la que me he convertido y de los logros que he alcanzado.

A mi abuela, quien ha sido como una segunda madre para mí, llenando un vacío en mi corazón con su amor incondicional y siempre estando presente cuando la he necesitado. También quiero dedicar este trabajo a mi familia y amigos, quienes de diversas formas me han brindado su apoyo inquebrantable a lo largo de este proceso.

Agradecimientos

A la Universidad Santo Tomás, por brindarme los recursos necesarios para culminar con éxito este proceso de aprendizaje.

A todos los docentes que hicieron parte de mi proceso formativo, brindando su conocimiento y experiencias en torno a la formación profesional.

A mi director de tesis el Ing. Juan Manuel Salgado por todo su apoyo, orientación y paciencia en el desarrollo de esta opción de grado.

A mi mamá por ayudarme a ser lo que soy y que siempre estuvo para apoyarme desde el accidentado inicio de mi formación profesional.

A mi hermano, abuelo, tías y tíos, que siempre estuvieron para apoyarme durante todo este tiempo.

A Miguel Lugo y Juan Esteban Ramírez por ser incondicionales conmigo y brindarme todo el apoyo y la amistad que una persona pudiera desear, y en especial a Pollo que sin su ayuda este trabajo no sería posible, espero estar siempre para ustedes.

A Valentina V, Natalie, Laura, Valentina M, Sebastián y Gaby por vivir tantas y tantas experiencias en esta etapa de la vida.

A todas las personas que directa o indirectamente estuvieron para apoyarme en mi proceso de formación.

Resumen

En este trabajo se realizó un análisis exhaustivo de la cimentación del edificio de la alcaldía de Villavicencio, considerando la interacción suelo-estructura. El objetivo principal fue evaluar cómo las características del suelo afectan el comportamiento de la cimentación y cómo la estructura influye en el suelo circundante. Para ello, se utilizaron los planos arquitectónicos del proyecto y herramientas computacionales especializadas como CYPECAD, GEO5 y PLAXIS 3D.

En CYPECAD se modeló el edificio para obtener una representación precisa de su geometría, materiales y condiciones de apoyo. Se tuvieron en cuenta las cargas aplicadas y las especificaciones de diseño de acuerdo con la normativa colombiana vigente. Posteriormente, se empleó GEO5 para realizar análisis geotécnicos detallados del suelo en el sitio del proyecto. Se llevaron a cabo estudios geotécnicos, como el análisis de capacidad de carga y el cálculo de asentamientos, utilizando los parámetros obtenidos de las investigaciones geotécnicas. Además, se utilizó PLAXIS 3D, un software especializado en análisis geotécnicos basado en elementos finitos, para evaluar en detalle la interacción suelo-estructura. Se modelaron la cimentación y el suelo circundante, considerando las propiedades y el comportamiento del suelo, así como las cargas aplicadas al edificio. Mediante cálculos precisos, se evaluaron los asentamientos, las tensiones y las deformaciones en la cimentación y la estructura.

Los resultados obtenidos en este estudio permitirán tomar decisiones fundamentadas en el diseño de la cimentación, con el objetivo de garantizar la seguridad y el adecuado rendimiento de la estructura frente a eventos sísmicos y las condiciones geotécnicas del sitio.

Palabras Claves: Interacción suelo-estructura, Cimentación, Herramientas computacionales CYPECAD, GEO5, PLAXIS 3D, Asentamientos, Eventos Sísmicos, Condiciones Geotécnicas.

Abstract

In this work, an exhaustive analysis of the foundation of the building of the mayor's office of Villavicencio was carried out, considering the soil-structure interaction. The main objective was to evaluate how soil characteristics affect the behavior of the foundation and how the structure influences the surrounding soil. For this, the architectural plans of the project and specialized computational tools such as CYPECAD, GEO5 and PLAXIS 3D were used.

In CYPECAD the building was modeled to obtain an accurate representation of its geometry, materials and support conditions. The applied loads and design specifications were taken into account in accordance with current Colombian regulations. Subsequently, GEO5 was used to perform detailed geotechnical analyses of the soil at the project site. Geotechnical studies, such as carrying capacity analysis and settlement calculation, were carried out using parameters obtained from geotechnical investigations. In addition, PLAXIS 3D, a software specialized in geotechnical analysis based on finite elements, was used to evaluate in detail the soil-structure interaction. The foundation and surrounding soil were modeled, considering the properties and behavior of the soil, as well as the loads applied to the building. By means of precise calculations, settlements, stresses and deformations in the foundation and structure were evaluated.

The results obtained in this study will allow informed decisions to be made in the design of the foundation, with the aim of guaranteeing the safety and adequate performance of the structure against seismic events and the geotechnical conditions of the site.

Keywords: Soil-Structure Interaction, Foundation, Computational Tools, CYPECAD, GEO5, PLAXIS 3D, GEO5, Settlements, Seismic Events, Geotechnical Conditions

Tabla de contenido

1. Introducción.....	12
2. Objetivos.....	13
2.1. Objetivo General	13
2.2. Objetivos Específicos.....	13
3. Alcance	14
4. Marco de Referencia.....	15
4.1. Marco conceptual	15
4.1.1. Estructuras Sismo Resistentes	15
4.1.2. Vigas.....	15
4.1.3. <i>Columnas</i>	15
4.1.4. <i>Cimentación</i>	16
4.1.5. <i>Fuerza Sísmica</i>	16
4.1.6. <i>Modelo Empotrado</i>	16
4.2. Marco Teórico	16
4.3. Antecedentes y Estado del Arte	17
5. Formulación del Problema.....	20
6. Justificación.....	21
7. Localización y Descripción del Área de Estudio.....	22
7.1. Localización del área de estudio	22
7.2. Descripción del área de estudio.....	23
8. Metodología.....	26
9. Características Geotécnicas del Suelo	27
9.1. Reconocimiento del área de estudio.....	27
9.2. Ensayos de laboratorio	29
9.3. Estratigrafía y condiciones geotécnicas del suelo.....	29
9.4. Clasificación del Suelo.....	31
9.5. Características sísmicas del sector	32
10. Modelo en Elementos Finitos	38
10.1. Modelo del edificio Alcaldía de Villavicencio.....	38

10.2. Modelo Interacción Suelo-Estructura.....	49
11. Cálculo de Capacidad de Carga.....	50
12. Cálculo de Asentamientos	59
13. Análisis de Resultados.....	66
13.1. Análisis del modelo y sus consideraciones.....	66
13.2. Análisis de la capacidad de carga	67
13.3. Análisis de asentamientos.....	68
14. Conclusiones.....	70
15. Recomendaciones	72
16. Referencias Bibliográficas.....	73

Lista De Tablas

Tabla 1. <i>Perfil Estratigráfico Sondeo No. 1</i>	30
Tabla 2. <i>Clasificación de los perfiles de suelo</i>	31
Tabla 3. <i>Definición zona sísmica</i>	32
Tabla 4. <i>Factores de carga de acuerdo a MAYERHOF, HANSEN y VESIC</i>	33
Tabla 5. <i>Dimensiones de columnas</i>	44
Tabla 6. <i>Cargas estructurales de Diseño</i>	47
Tabla 7. <i>Elementos de Cimentación</i>	49
Tabla 8. <i>Capacidad de carga teniendo en cuenta el comportamiento las condiciones geotécnicas del sitio - Estático</i>	56
Tabla 9. <i>Capacidad de carga teniendo en cuenta el comportamiento de la cimentación frente a eventos sísmicos - Dinámico</i>	58
Tabla 10. <i>Cálculo Carga Total</i>	60
Tabla 11. <i>Cálculo carga total</i>	62
Tabla 12. <i>Cálculo límite de asentamientos totales</i>	63
Tabla 13. <i>Valores máximos de asentamientos diferencias calculados, expresados en función de la distancia entre apoyos o columnas</i>	64
Tabla 14. <i>Δ Asentamiento (asentamiento diferencial) calculado y permitido</i>	64

Listado de Figuras

Figura 1. <i>Vista frontal Edificio Alcaldía Municipal.</i>	22
Figura 2. <i>Vista lateral Edificio Alcaldía Municipal.</i>	23
Figura 3. <i>Vista general de Villavicencio.</i>	24
Figura 4. <i>Localización general del proyecto.</i>	24
Figura 5. <i>Metodología.</i>	26
Figura 6. <i>Localización del sondeo realizado parqueadero AG</i>	28
Figura 7. <i>Cálculo de la capacidad portante</i>	36
Figura 8. <i>Vista isométrica edificio Alcaldía de Villavicencio</i>	38
Figura 9. <i>Vista frontal Edificio Alcaldía de Villavicencio</i>	39
Figura 10. <i>Planta piso 1</i>	40
Figura 11. <i>Planta Mezanine</i>	41
Figura 12. <i>Planta Piso 2 a Piso 10</i>	42
Figura 13. <i>Planta del cuarto de maquinas</i>	43
Figura 14. <i>Información generales de los materiales</i>	45
Figura 15. <i>Vista en planta- Ubicación de la Cimentación del Edificio Alcaldía de Villavicencio</i>	46
Figura 16. <i>Asignación de perfil estratigráfico.</i>	50
Figura 17. <i>Profundidad de Cimentación.</i>	51
Figura 18. <i>Cargas a la Cimentación.</i>	52
Figura 19. <i>Geometría de la cimentación.</i>	53
Figura 20. <i>Características materiales de cimentación</i>	53
Figura 21. <i>Características del sísmicas.</i>	54
Figura 22. <i>Verificación de capacidad portante vertical</i>	55
Figura 23. <i>Verificación de asentamientos.</i>	56
Figura 24. <i>Modelo tridimensional.</i>	61
Figura 25. <i>Deformaciones.</i>	61
Figura 26. <i>Curva de Asentamientos vs Carga</i>	62

1. Introducción

Los terremotos o sismos son fenómenos naturales que pueden causar graves daños a las estructuras y a las personas. Por esta razón, la ingeniería civil debe estudiar y diseñar soluciones que garanticen la seguridad y el desempeño de las edificaciones ante estos eventos. En el contexto colombiano, donde se presentan frecuentes sismos debido a la ubicación del país en el cinturón de fuego del Pacífico, es fundamental contar con normas y criterios técnicos que orienten la práctica profesional de los ingenieros civiles. Una de las herramientas más importantes para el diseño sísmico es el análisis del comportamiento dinámico de las estructuras, que depende en gran medida de las propiedades del suelo donde se fundan. El suelo puede modificar la intensidad y la frecuencia de las ondas sísmicas que se propagan desde el foco del terremoto hasta la superficie, e incluso amplificarlas si se presentan condiciones de resonancia. Por lo tanto, es necesario caracterizar adecuadamente el suelo y sus efectos sobre las estructuras, mediante ensayos geotécnicos y modelos matemáticos (Meza Soto, 2020).

Por eso se habla de diseño sismorresistente, porque tiene en cuenta los requisitos adicionales que aparecen durante la actividad sísmica, para asegurar, además de la correcta resistencia de los elementos a los mismos, también el correcto comportamiento en diversas situaciones. Porque todavía no se sabe con certeza cuánta energía se liberará o cuándo ocurrirá un sismo (Mata Lemus, 2015).

La interacción suelo-estructura (ISE) es, como su nombre lo indica, la respuesta conjunta del suelo y la estructura a las cargas sísmicas que provocan esfuerzos y deformaciones distintas a las consideradas para una estructura de suelo rígido. Este efecto es de gran importancia porque ningún edificio podría separarse del suelo de cimentación en el análisis y diseño estructural, es decir, se modela un comportamiento más realista del edificio (Villareal Castro, 2009).

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar el desempeño actual de la cimentación del edificio de la Alcaldía de Villavicencio mediante un análisis detallado de la interacción suelo-estructura.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características geotécnicas del suelo en el sitio del proyecto mediante estudios geotécnicos y pruebas de laboratorio.
- Modelar el edificio considerando las cargas aplicadas según las especificaciones de diseño y teniendo en cuenta la normativa colombiana vigente.
- Realizar cálculo de capacidad de carga teniendo en cuenta el comportamiento de la cimentación frente a eventos sísmicos y las condiciones geotécnicas del sitio.
- Modelar la cimentación y el suelo circundante utilizando herramientas computacionales especializadas, considerando las propiedades del suelo, las cargas aplicadas al edificio y el cálculo de los asentamientos.
- Proponer recomendaciones y mejoras en el diseño de la cimentación para garantizar su adecuado rendimiento y la seguridad de la estructura a largo plazo.

3. Alcance

Con el presente proyecto se pretende realizar una evaluación exhaustiva de la cimentación del edificio de la Alcaldía de Villavicencio, ubicado en el departamento del Meta, Colombia, teniendo en cuenta su interacción con el suelo. El alcance del proyecto abarca los siguientes aspectos:

- ✓ Análisis de la interacción suelo-estructura: Se realizará un análisis detallado de la interacción entre la cimentación y el suelo circundante, considerando las características geotécnicas del suelo y su influencia en el comportamiento de la estructura.
- ✓ Evaluación del desempeño de la cimentación: Se evaluará el desempeño actual de la cimentación del edificio de la Alcaldía, teniendo en cuenta las cargas aplicadas y las condiciones geotécnicas del sitio. Se analizarán aspectos como la capacidad de carga, los asentamientos y las tensiones en la cimentación.
- ✓ Uso de herramientas computacionales: Se emplearán herramientas computacionales especializadas como CYPECAD, GEO5 y PLAXIS 3D para modelar la estructura, realizar análisis geotécnico, y evaluar la interacción suelo-estructura de manera precisa y detallada.
- ✓ Recomendaciones de diseño y mejoras: Con base en los resultados obtenidos, se propondrán recomendaciones y mejoras en el diseño de la cimentación para garantizar su seguridad y rendimiento adecuado frente a eventos sísmicos y las condiciones geotécnicas del sitio.

4. Marco de Referencia

En esta sección, se hará un acercamiento a los conceptos necesarios para contextualizarse acerca del proyecto tocando temáticas como geotecnia y la interacción suelo-estructura, también habrá una descripción de los estudios recientes sobre este tema nivel nacional y en el exterior.

4.1. Marco conceptual

4.1.1. Estructuras Sismo Resistentes

Se entiende que una estructura sísmica es aquella capaz de resistir sin daños apreciables provocados por sismos, por lo que es importante contar con un diseño estructural en condiciones tales como; cargas y sobrecargas para minimizar el daño a la estructura.

Los elementos considerados para una estructura antisísmica son vigas, columnas, muros de carga, que, entre otras cosas, constituyen una estructura desde la cimentación hasta la cubierta.

4.1.2. Vigas

Son elementos estructurales generalmente colocados en posición horizontal, estas partes están apoyadas sobre las columnas, soportando cargas.

4.1.3. Columnas

Son el elemento vertical de la estructura, responsables de soportar el peso de toda la estructura. Se encargan de la distribución de cargas y fuerzas axiales.

4.1.4. Cimentación

Tiene la función de soportar y distribuir todo el peso de la estructura en el suelo, la cimentación en caso de sismo crea una base rígida para la estructura, capaz de transmitir al suelo los impactos creados por la interacción suelo-estructura, sin falla o deformación mayor en el suelo.

4.1.5. Fuerza Sísmica

Es cualquier fuerza debida a los movimientos de la tierra provocados por un terremoto. El diseño de los elementos horizontales de la estructura en la zona sísmica es de fundamental importancia porque estos elementos son los menos resistentes a este tipo de movimiento.

4.1.6. Modelo Empotrado

Modelo teórico de un edificio que limita el soporte en la base a 0 grados de libertad. A esto se le llama empotramiento perfecto.

4.1.7. Deriva.

Se define como la relación entre el desplazamiento relativo de un piso y la altura del piso. Estos desplazamientos son función de la rigidez de la superestructura.

4.2. Marco Teórico

4.2.1. Interacción Suelo-Estructura

Se abordará la teoría y los conceptos relacionados con la interacción entre el suelo y la estructura, considerando los diferentes tipos de cimentaciones y su comportamiento frente a las cargas aplicadas. Se explorarán las influencias mutuas entre el suelo y la estructura, así como los mecanismos de transmisión de cargas y las deformaciones que pueden generar en la cimentación (Mata Lemus, 2015).

4.2.2. Geotecnia

Se profundizará en los principios de la geotecnia, incluyendo la clasificación y caracterización de los suelos, sus propiedades físicas y mecánicas, así como los métodos de ensayo utilizados para obtener parámetros geotécnicos relevantes. Se analizarán aspectos como la capacidad de carga, la compresibilidad, la permeabilidad y la estabilidad del suelo, que tienen implicaciones directas en el comportamiento de la cimentación.

4.2.3. Normativa y reglamentación

Se revisarán las normas y reglamentos colombianos vigentes en materia de construcción sismo resistente y diseño de cimentaciones. Se estudiarán las disposiciones y criterios establecidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y otras normativas relacionadas, con el fin de asegurar que la cimentación cumpla con los estándares de seguridad y desempeño establecidos.

4.2.4. Herramientas computacionales

Se explorarán las herramientas computacionales especializadas utilizadas en el proyecto, como CYPECAD, GEO5 y PLAXIS 3D. Se analizará su funcionamiento, capacidades y limitaciones, así como los métodos numéricos empleados para realizar los análisis estructurales y geotécnicos. Se abordarán las ventajas de utilizar estas herramientas en la modelación y evaluación de la interacción suelo-estructura.

4.3. Antecedentes y Estado del Arte

Actualmente en Colombia la mayoría de los diseños estructurales en edificios de concreto reforzado se realizan mediante análisis lineal. Este método es el más común como base de diseño, ya que es algo más simple; pero hay que tener en cuenta que este no considera una gran cantidad de variables que influyen en el comportamiento de la edificación, y dadas ciertas condiciones se asume un comportamiento alejado de la realidad.

Diferentes autores alrededor del mundo estudian el comportamiento del suelo frente a un sismo y como esto afecta la vulnerabilidad de las estructuras. Algunos trabajos en este tema y que se toman como referencia para el presente proyecto se presentan a continuación.

Moreno de Luca (2010), recopiló información distintos modelos de interacción propuestas con el fin de seleccionar el más apropiado a los requerimientos necesarios. De igual forma definió un perfil de suelo representativo para la ciudad de Bucaramanga y obtuvo los parámetros necesarios para la modelación de este en la interacción suelo estructura, posterior a esto se realizó una descripción detallada en todos los parámetros utilizados para el diseño estructural y se obtuvo los parámetros que definieron el diseño estructural de la edificación como respuesta del análisis modal y dinámico realizado a los modelos.

Simón A. Calle (2011), orientó un estudio al análisis de la respuesta estructural de la Catedral de la Inmaculada concepción considerando su interacción suelo-estructura, constituyendo la continuación del proyecto de investigación de la vulnerabilidad del sistema estructural de la misma, que se lleva a cabo en la Universidad de Cuenca por medio de la Red Sísmica del Austro, y dirigido por el Ing. Enrique García.

Diego Curasma y Aguirre Noa (2015), elaboraron un diagnóstico situacional de las escuelas públicas de la ciudad de Lircay identificando los diferentes factores de vulnerabilidad físico estructural y funcional existentes en las diferentes escuelas públicas para establecer los parámetros cuantitativos y cualitativos que permitieron determinar de una manera objetiva los niveles de vulnerabilidad físico estructural y funcional existentes con el fin de formular estrategias para reducir las vulnerabilidades en las diferentes escuelas públicas de la ciudad.

En el mismo año, Mata Lemus evaluó los efectos de la acción sísmica real, sobre una edificación regular de concreto armado, considerando la interacción suelo-estructura de manera explícita tomando en cuenta la rigidez del sistema suelo-fundación con sistemas de fundaciones superficiales, utilizando un software de última generación. Además de analizar comparativamente la varianza de la respuesta obtenida con la incorporación de la consideración de la interacción suelo-estructura con el uso de la metodología explícitas simplificada, contra la metodología tradicional, determinando así, si es un procedimiento viable en el análisis y diseño estructural.

León Freire (2017), determinó las características del análisis sísmico de edificaciones con sótano utilizando interacción suelo-estructura aplicando tres métodos de estudio: en el primero se realizó un análisis sísmico considerando el edificio empotrado en la superficie y se obvió la presencia del sótano. En el segundo método consideró la presencia del sótano y en el tercer método se consideró al edificio con sótano y se añade al análisis sísmico los principios de la interacción suelo-estructura.

Mejía Bahamón (2018), realizó la evaluación estructural de un edificio convencional de 10 pisos usado para vivienda en las zonas lacustres de Bogotá, mediante un análisis elástico lineal y no lineal (Push Over) considerando los efectos de la interacción suelo-estructura, los principios de la mecánica estructural, los reglamentos internacionales y NSR-10. Para lo cual recolectó información necesaria como; datos del suelo, la microzonificación sísmica de Bogotá, el diseño arquitectónico, la geometría de la estructura, el avalúo de cargas verticales, cargas sísmicas entre otros.

Reyes Negrete (2019), representó la vulnerabilidad sísmica del sistema suelo-cimentación-estructura de la catedral de Morelia, ante la excitación dinámica del suelo inducida por un conjunto de sismos en específico, a través de un modelo matemático por medio del método de elementos finitos bidimensionales respecto a los análisis dinámicos en la historia del tiempo lineales y no lineales.

Mori Infante Y Tori Tori (2020), realizaron un análisis dinámico espectral, para lo cual llevaron a cabo uno de la miento considerando una base empotrada y otra flexible mediante el uso de resortes que mueven la respuesta elástica del suelo de Fundación de los efectos ISE. Diseñaron tres principales elementos estructurales (viga, columna y placa) para cada caso trabajando de acuerdo con la norma E 060 (Perú) y realizaron un análisis tiempo-historia con 5 señales sísmicas registradas en suelo peruano como en los años 1951, 1966, 1970, 1971 y 1974 por último compararon los resultados obtenidos entre el modelo empotrado y el de ISE. De igual forma analizaron los períodos, cortantes, momentos, deriva de entrepiso y fuerzas internas de los elementos seleccionados para el diseño.

5. Formulación del Problema

Debido a la clasificación de la ciudad de Villavicencio como zona de amenaza sísmica alta, se deben tener en consideración diferentes factores al momento de diseñar una edificación, dichos factores y consideraciones se compilan en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente (NSR-10) puesto en vigencia en el año 2010. Por lo tanto, es necesario prestar atención a las construcciones erigidas antes de la vigencia de este.

El edificio de la alcaldía de Villavicencio fue construido alrededor de 1966 y originalmente se llamaba “Edificio de la Beneficencia del Meta”. En ese momento, era el edificio más alto de la ciudad. Actualmente, es la sede principal de la administración municipal de esta ciudad colombiana, capital del departamento del Meta. Está ubicado en la calle 40 N° 33 - 64, en el centro de la ciudad, y cuenta con diez pisos donde se distribuyen las diferentes dependencias y oficinas que prestan servicios a la ciudadanía. Tiene una arquitectura moderna y funcional. El edificio de la alcaldía es importante porque representa el poder político y administrativo de la ciudad, así como el espacio de participación y control ciudadano (Alcaldía de Villavicencio, 2023). La falta de conocimiento respecto a la influencia de las características del suelo en el comportamiento de la cimentación y la respuesta de la estructura genera incertidumbre acerca de su seguridad y rendimiento ante eventos sísmicos y condiciones geotécnicas específicas

En consecuencia, el presente trabajo pretende responder a la interrogante: **¿Cuál es el comportamiento y respuesta de la cimentación del edificio de la alcaldía de Villavicencio en relación a su interacción con el suelo circundante?**

Se propone abordar estos interrogantes mediante el uso de herramientas computacionales especializadas, como CYPECAD, GEO5 y PLAXIS 3D, para realizar un análisis exhaustivo de la cimentación y su interacción con el suelo, con el fin de obtener resultados que orienten en la toma de decisiones fundamentadas para el diseño y mejora de la cimentación de la estructura de la alcaldía de Villavicencio.

6. Justificación

La evaluación exhaustiva de la cimentación del edificio de la alcaldía de Villavicencio es de vital importancia debido a diversas razones. En primer lugar, esta estructura fue construida antes de la entrada en vigor del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), lo que implica que su diseño y construcción no tuvieron en cuenta las consideraciones sísmicas y geotécnicas más actualizadas. Por lo tanto, es crucial comprender cómo estas deficiencias pueden afectar la seguridad y el rendimiento de la cimentación frente a eventos sísmicos y las condiciones geotécnicas del sitio. Tal es el caso del edificio de la alcaldía de Villavicencio, el cual fue construido en el año 1966 y no se ha sometido a ningún proceso de evaluación o reforzamiento estructural (Alcaldía de Villavicencio, 2019).

Además, la ciudad de Villavicencio, ubicada en el Departamento del Meta, es una zona sísmicamente activa, lo que aumenta la importancia de contar con una cimentación adecuada que pueda resistir las fuerzas y deformaciones generadas por los movimientos telúricos. El edificio de la alcaldía desempeña un papel fundamental en la infraestructura y prestación de servicios públicos de la ciudad, por lo que su seguridad y funcionamiento continuo son fundamentales para la comunidad (Chopra, 2012). La interacción suelo-estructura es un factor clave que puede influir en el comportamiento y la respuesta de la cimentación. Comprender cómo las características del suelo afectan la cimentación y cómo la estructura influye en el suelo circundante es esencial para tomar decisiones informadas en cuanto al diseño y mejora de la cimentación. Este estudio permitirá identificar las deficiencias existentes en la cimentación actual, así como proponer medidas adecuadas de diseño y mejoramiento que garanticen la seguridad y el adecuado rendimiento de la estructura frente a eventos sísmicos y condiciones geotécnicas del sitio.

A menudo se supone un modelo de empotramiento perfecto entre la estructura y el sistema de cimentación y, por lo tanto, no se considera el comportamiento real de la interacción suelo-estructura. Este supuesto no representa estrictamente las condiciones reales de soporte de la estructura, a pesar de ello es aceptado en las normas colombianas y en la mayoría de las normas de diseño del mundo como válido para el diseño de nuevas edificaciones. Por lo tanto, se tendrá en cuenta el Título H de la misma norma para incorporar al análisis un modelo que considere la interacción suelo – estructura y otro sin considerarla, haciendo una comparativa de los mismos para finalmente determinar el nivel de vulnerabilidad frente a un evento sísmico (Moreno De Luca, 2010).

7. Localización y Descripción del Área de Estudio

7.1. Localización del área de estudio

El análisis se realizará puntualmente en la comuna dos (2) de Villavicencio, específicamente el edificio de la Alcaldía Municipal de Villavicencio localizado en la dirección en la Cl. 40 #33 – 64 (Ver **Figura 1- Figura 2**).

Figura 1. *Vista frontal Edificio Alcaldía Municipal.*



Nota. Adaptado de (Periodico del Meta, 2022).

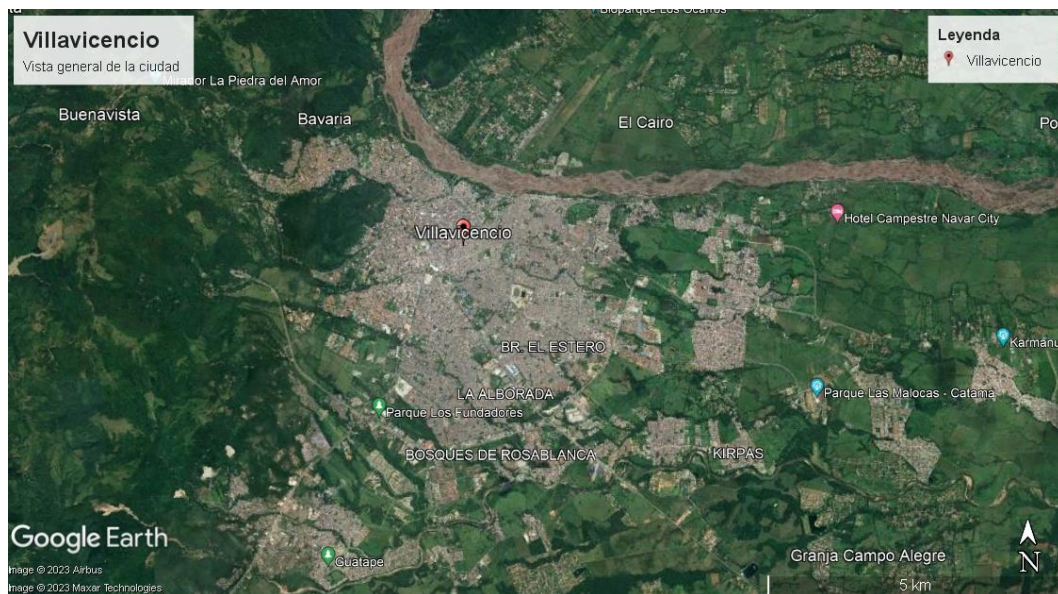
Figura 2. *Vista lateral Edificio Alcaldía Municipal.*



Nota. Tomado de (Periodico del Meta, 2022)

7.2. Descripción del área de estudio

Villavicencio es la capital del departamento del Meta, centro de desarrollo económico y social de los llanos orientales de Colombia. El comercio es el sector más dinámico de la economía, ya que la mayor parte de las industrias agrícolas y agropecuarias del llano oriental se canalizan a través de Villavicencio hacia Bogotá y otras ciudades del interior (Ver **Figura 3 - Figura 4**).

Figura 3. Vista general de Villavicencio.

Nota. Adaptado de (Google Earth, 2022).

Figura 4. Localización general del proyecto.

Nota. Adaptado de (Google Earth, 2022)

La ciudad está situada en el límite oriental de las estribaciones de la cordillera oriental; Se ubica a los $0^{\circ} 09' 12''$ N y $73^{\circ} 38' 06''$ O, a 467 metros sobre el nivel del mar y a 126 km al sureste de Bogotá. En el territorio del municipio se distinguen claramente dos zonas, una montañosa, que

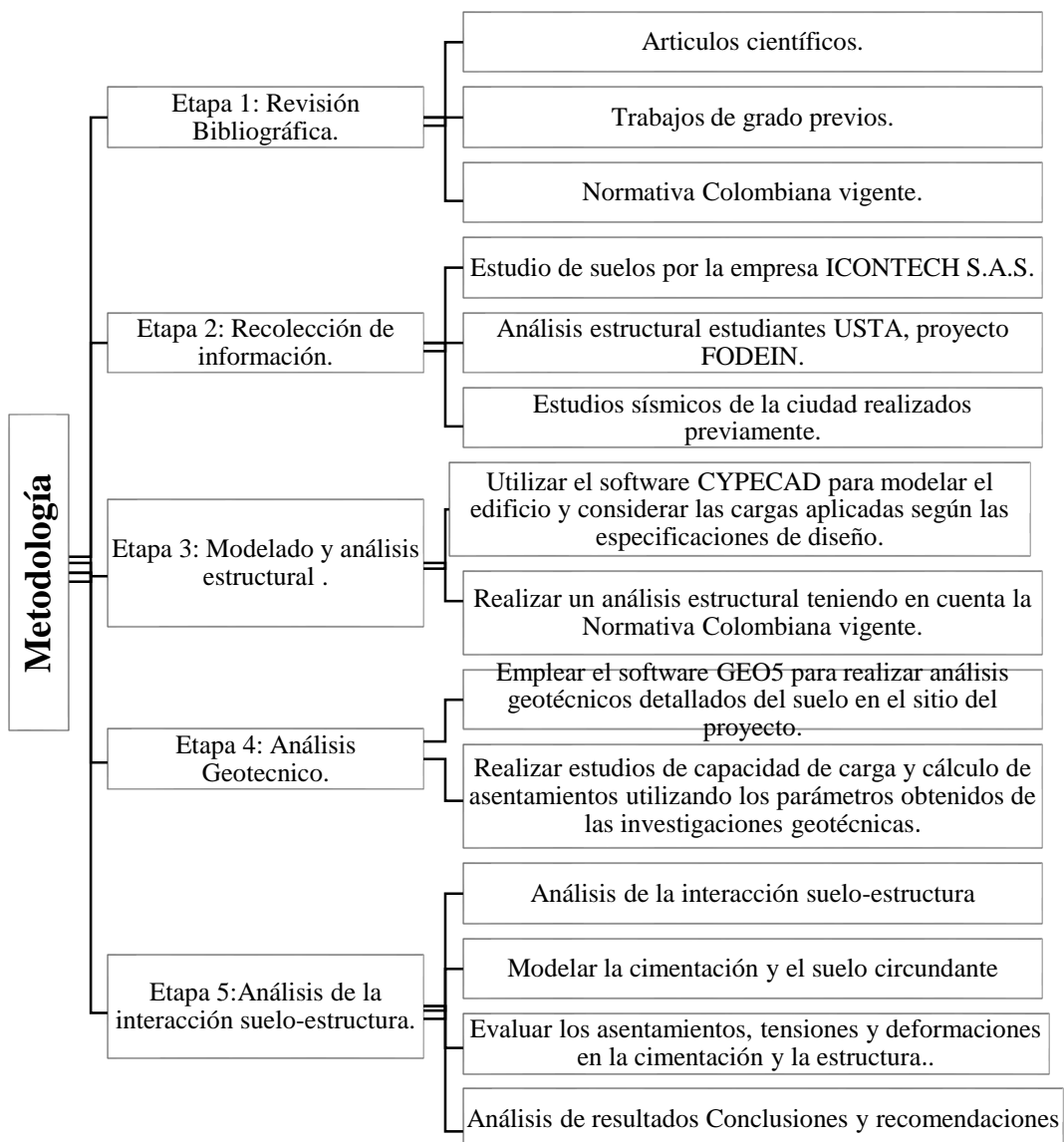
se ubica al occidente y noroeste de la ciudad y está constituida por el lado oriental de la cordillera oriental, y la otra llana ligeramente inclinada hacia el oriente. y al sureste, que corresponde al piedemonte y limita al norte con el Río Guatiquía y al sur con el río Guayuriba; los ríos Ocoa y Negro atraviesan la parte central de esta planicie, así como numerosas quebradas y pequeños riachuelos. La precipitación media anual es de 4.260 mm, lo que es un factor importante en el desencadenamiento de la formación o activación de deslizamientos. Las lluvias se distribuyen en un sistema monomodal, donde los meses más lluviosos son abril, mayo y octubre (Ramos Cañón & Alfaro Castillo, 2000).

Por otro lado, en el edificio de la Alcaldía de Villavicencio se gestionan los planes, programas y proyectos que buscan el desarrollo integral de Villavicencio y sus habitantes. Además, el edificio alberga el despacho del alcalde, quien es la máxima autoridad del municipio y el representante legal de la entidad territorial. El edificio de la alcaldía también está relacionado con otros aspectos de la vida social, cultural y económica de la ciudad. Por ejemplo, en sus instalaciones se realizan eventos conmemorativos, culturales y educativos, como el aniversario de Villavicencio, ferias de emprendimiento, exposiciones artísticas, entre otros. Asimismo, el edificio está cerca de otros lugares emblemáticos de la ciudad, como la plaza Los Libertadores, el parque Infantil y la catedral Nuestra Señora del Carmen (Alcaldía de Villavicencio, 2023).

8. Metodología

En el desarrollo del presente proyecto se consideró que la investigación es de tipo mixta, es decir que en primera instancia se compila información existente del área de estudio, para así poder desarrollar esta investigación bajo el seguimiento de los lineamientos establecidos por la normativa vigente, en esta metodología se contemplan una serie de etapas que contribuyen a lograr cada uno de los objetivos planteados y que se esquematiza de la siguiente manera (Ver **Figura 5**):

Figura 5. Metodología



9. Características Geotécnicas del Suelo

En el presente capítulo se describe la organización de los trabajos de campo y sus características principales, como el tipo de exploración, localización y profundidad de la exploración geotécnica, además de los resultados de los ensayos realizados.

En las actividades de campo se incluyeron la planeación, localización, realización de las perforaciones, así como la toma de muestras para ensayos, se determinaron los espesores de los diversos estratos en cada uno de los apiques realizados y se obtuvo el material para los ensayos de laboratorio requeridos.

La finalidad de la exploración geotécnica para la evaluación del suelo de fundación, consistió en determinar las características físicas y geomecánicas de los estratos existentes, las características del subsuelo y del material granular existente y además se realiza el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) de los suelos examinados, lo que permite evaluar la calidad relativa de los suelos, evaluándose, en lo en lo posible, las condiciones “In Situ”.

9.1. Reconocimiento del área de estudio.

Antes de iniciar la exploración se realizó un reconocimiento del área objeto de estudio, apoyándose en mapas geológicos y toda la información necesaria para la identificación de las características de la zona en donde se desarrolla el proyecto. Debido a que no fue posible realizar el estudio en inmediaciones de la edificación, se realizó en un parqueadero cercano al edificio objeto de estudio (Ver **Figura 6**).

Figura 6. Localización del sondeo realizado parqueadero AG



Nota. Adaptado de (Incotech, 2021)

Una vez analizada la información existente se realizó una visita previa a la zona de estudio de los trabajos a los sectores a intervenir definiendo la profundidad de la exploración y los sitios para la toma de la perforación, referenciando a partir de coordenadas geográficas, que para el caso de este estudio de suelos fueron de: **N: -73.639437°** y **E: 4.152230°**.

Para establecer las propiedades y características geotécnicas del subsuelo se realizó el sondeo con una profundidad respectiva de 2,5 metros en la ubicación con coordenadas geográficas mencionada anteriormente, cumpliendo con la normativa sismorresistente en su título H respectivo a alcances en profundidad y área de estudio.

Los métodos realizados en esta etapa de reconocimiento, corresponden al uso de equipos de perforación manual, además se realiza tomas de muestras inalteradas cohesivas con el muestreador cuchara partida para ensayos de penetración SPT, con el fin de hacer un muestreo continuo y detallado del subsuelo.

9.2. Ensayos de laboratorio

Haciendo uso de las muestras obtenidas de las perforaciones y caracterizando las muestras recuperadas con el fin de determinar los parámetros de resistencia se llevaron a cabo los siguientes ensayos: Humedad natural (Norma INV-E-122), Granulometría (Norma INV-E-123), Límites de Atterberg (INV-E-123) (INV-E-126) y Peso específico (INV-E-128).

Basándose en los resultados de las pruebas, el suelo se clasificó según el sistema de clasificación unificado SUCS. En este sistema se determinaron las familias que predominan en el subsuelo y se obtuvo valores de resistencia para determinar el comportamiento del suelo y con base en esto, definir el tipo y la profundidad de la cimentación.

9.3. Estratigrafía y condiciones geotécnicas del suelo.

9.3.1. Nivel freático

No se encontró nivel freático en el sondeo realizado, es importante resaltar que el nivel freático varía según la estación del año en la que se realiza el estudio del suelo (Incotech, 2021).

9.3.2. Perfiles estratigráficos

Basado en los trabajos de campo y resultados en el laboratorio desarrollados, se establece el perfil estratigráfico promedio del subsuelo (Ver **Tabla 1**).

Tabla 1. Perfil Estratigráfico Sondeo No. 1

Obra		Informe geotecnico proyecto fodein										
Localización		Parqueadero AG, Centro de Villavicencio, Meta										
Norma		INV-E111										
Observaciones		SONDEO No. 1										
Prof.	Estrato	Descripción	N (Spt)	Indice de plasticidad				Pasa 200 %	Clasificación		Pesos especificos	
				L.L %	L.P %	I.P %	W nat %		A.A.S.T.H.O	U.S.C	γs(gr/cm3)	γd(gr/cm3)
0,00		GRAVA ARENOSA DE CONSISTENCIA MEDIA CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA COLOR CAFÉ OSCURO	2/2/2	NL	NP	NL-NP	5,07	11,21	A-1-b	GW	1,83	1,742
0,10												
0,20												
0,30												
0,40												
0,50	ARENA ARCILLOSA DE BAJA PLASTICIDAD CAFÉ OSCURA CON VETAS NARANJAS OSCURO	7/7/13	NL	NP	NL-NP	13,86	14,19	A-1-b	GP	1,975	1,735	
0,60												
0,70												
0,80												
0,90	GRAVA ARENOSA COLOR GRIS DE CONSISTENCIA MEDIA DE MATRIZ ARCILLOSA CAFÉ	17/23/22	NL	NP	NL-NP	11,35	12,55	A-1-b	GP	1,924	1,728	
1,00												
1,10												
1,20												
1,30												
1,40	GRAVA ARENOSA DE CONSISTENCIA MEDIA CAFÉ OSCURO CON VETAS	7/7/13	NL	NP	NL-NP	13,86	14,19	A-1-b	GP	1,975	1,735	
1,50												
1,60												
1,70												
1,80												
1,90	GRAVA ARENOSA DE CONSISTENCIA MEDIA CAFÉ OSCURO CON VETAS	17/23/22	NL	NP	NL-NP	11,35	12,55	A-1-b	GP	1,924	1,728	
2,00												
2,10												
2,20												
2,30												
2,40	GRAVA ARENOSA DE CONSISTENCIA MEDIA CAFÉ OSCURO CON VETAS	17/23/22	NL	NP	NL-NP	11,35	12,55	A-1-b	GP	1,924	1,728	
2,50												

Nota. Adaptado de (Incotech, 2021)

9.4. Clasificación del Suelo

Según el artículo A.2.4.4 NSR-10 - DEFINICION DEL TIPO DE SUELO es **D** debido a que la velocidad de onda de corte se encuentra dentro de los límites, cumpliendo la condición $50 > \bar{N} > 15$ (Ver **Tabla 2**).

Tabla 2. Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{V}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{V}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{V}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{V}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w $\geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Nota. Adaptado de (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

9.5. Características sísmicas del sector

9.5.1. Definición de zona de amenaza sísmica de Aa y Av

El municipio de Villavicencio se encuentra clasificado en una zona sísmica Alta según la NSR-10 apéndice A-4 *Valores Aa, Av, Ae y Ad y definición de la zona de amenaza sísmica de los municipios colombianos* (Ver **Tabla 3**)

Tabla 3. Definición zona sísmica

Departamento del Meta					
Municipio	Zona de amenaza Sísmica	Aa	Av	Ae	Ad
Villavicencio	Alta	0.35	0.30	0.20	0.07

Nota. Adaptado de (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

Para la evaluación del parámetro de la resistencia al corte y a la compresión uniaxial del perfil estratigráfico el suelo, se utilizó el valor de N del ensayo SPT se aprecia en la **Tabla 1**.

La siguiente tabla se requirió para determinar los valores de los factores de carga Nc, Nq y Ny (Ver **Tabla 4**). Según las características geotécnicas obtenidas, perfiles registrados y la presencia de **GRAVA ARENOSA BIEN GRADUADA DE MATRIZ ARCILLOSA COLOR CAFÉ OSCURO** de compacidad compacta (Incotech, 2021).

Tabla 4. Factores de carga de acuerdo a *MAYERHOF, HANSEN y VESIC*

ϕ	N_c	N_q	$N_r(H)$	$N_r(M)$	$N_r(V)$	N_q / N_c	$2 \tan \phi (1 - \sin \phi)$
0	5,14	1,00	0	0	0	0,195	0
5	6,49	1,60	0,10	0,10	0,4	0,242	0,146
10	8,34	2,50	0,40	0,40	1,2	0,298	0,241
15	10,97	3,90	1,20	1,10	2,6	0,359	0,294
20	14,83	6,40	2,90	2,90	5,4	0,431	0,315
25	20,71	10,70	6,80	6,80	10,9	0,514	0,311
26	22,25	11,80	7,90	8,00	12,5	0,533	0,308
28	25,79	14,70	10,90	11,20	16,7	0,57	0,299
30	30,13	18,40	15,10	15,70	22,4	0,61	0,289
32	35,47	23,20	20,80	22,00	30,2	0,653	0,276
34	42,14	29,40	28,70	31,10	41	0,698	0,262
36	50,55	37,70	40,00	44,40	56,2	0,746	0,247
38	61,31	48,90	56,01	64,00	77,9	0,797	0,231
40	75,25	64,10	79,40	93,60	109,3	0,852	0,214
45	133,73	134,70	200,50	262,30	271,3	1,007	1,172
50	266,5	318,50	567,40	871,70	781,3	1,195	0,131

Nota. Adaptado de (Incotech, 2021)

9.5.2. *Cálculo de la capacidad portante*

Para el realizar cálculo de la capacidad portante se tuvo en consideración el suelo **GRAVA ARENOSA DE CONSISTENCIA MEDIA CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA COLOR CAFÉ OSCURO** compacidad compacta en los estratos y teniendo en cuenta las recomendaciones del capítulo H de la norma NSR-10 (Incotech, 2021). La ecuación utilizada en el cálculo fue la siguiente:

Ecuación 1. *Capacidad de Carga Ultima*

$$q_u = c'N_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad Ec. (1)$$

Donde:

q_u = Capacidad de carga ultima (kN/m²)

c' = Cohesión del estrato, (kPa)

γ = Peso unitario del suelo (kN/m³)

N_c, N_q, N_γ = Coeficientes de capacidad de carga adimensionales

B = Ancho de la cimentación (m)

$q = \gamma D_f$; D_f = profundidad de la cimentación (m)

La capacidad de carga admisible es calculada considerando un factor de seguridad de tres (3.00) recomendado por normativa para evitar la falla por capacidad portante se obtiene:

Ecuación 2. *Capacidad de carga admisible*

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{ult}}{F.S.} \quad Ec. (2)$$

Donde:

δ_p : Capacidad de carga admisible

δ_{ult} : Capacidad de carga

F.S: Factor de seguridad

A continuación, se presenta la hoja de cálculo realizada por la empresa INCONTECH SAS basados en la teoría de Terzaghi y Peck, en la cual se presenta como información de campo el ensayo penetración estándar SPT, y basados en él se determinan características del suelo y unos valores asumidos de ancho y profundidad de cimentación, en concordancia con el proyecto de construcción.

Se eligió el estrato clasificado como **GRAVA ARENOSA DE CONSISTENCIA MEDIA CONPOCA PRESENCIA DE ARCILLA COLOR CAFÉ OSCURO** y se trabajó sobre el valor más crítico de la SPT (Ver **Figura 7**).

Figura 7. Cálculo de la capacidad portante

INCONTECH SAS Calidad e Innovación		INCONTECH SAS NIT: 901376424-1 CALCULO DE LA CAPACIDAD PORTANTE			Codigo:	SGC-PDS-F020	
					Version:	1	
					Fecha:	20/01/2020	
					Pagina:	1 DE 1	
OBRA:	INFORME GEOTECNICO PROYECTO FODEIN				NORMA:	NSR-10	
CLIENTE:	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL UNIVERSIDAD SANTO TOMAS						
LOCALIZACION:	PARQUEADERO AG - CENTRO DE VILLAVICENCIO, DEPARTAMENTO DEL META						
FECHA RECIBO:	10 de julio de 2021				FECHA INFORME:	22-jul-21	
OBSERVACIONES: Sondeos, ensayos de clasificación y SPT a diferentes profundidades. Angulo de fricción obtenido de la correlacion con la compacidad (Hunt 1.984)							
DATOS INICIALES TIPO DE SUELO SONDEO 1							
PARAMETROS							
qu (Inconfnada) (T/m2)	0.00		Angulo de fricción interna (*)	28			
Peso Volumetrico suelo (T/m3)	17.42		Nc (según Terzaghi)	25.79			
Factor de seguridad	3.0		Nq (según Terzaghi)	14.7			
N (Número golpes/pie)	4.0		Cu (T/m2)	0			
			Ny (según Terzaghi)	11.2			
CAPACIDAD CARGA ADMISIBLE (Ton/m²) PARA B < 1,00 m							
PROFUNDIDAD CIMENTACION	PROFUNDIDAD CIMENTACION	ZAPATAS S/TERZAGHI ANCHO CIMIENTO (m)			CIMIENTO CONTINUO S/TERZAGHI ANCHO CIMIENTO (m)		
m	pie	1.00	1.20	1.40	1.00	1.20	1.40
1.00	3.28	8.1	9.8	11.4	7.1	8.5	9.9
1.30	4.27	10.6	12.7	14.8	9.2	11.0	12.9
1.70	5.58	13.8	16.6	19.3	12.0	14.4	16.8
2.10	6.89	17.1	20.5	23.9	14.8	17.8	20.8
2.30	7.55	18.7	22.4	26.2	16.3	19.5	22.8
2.50	8.20	20.3	24.4	28.5	17.7	21.2	24.7
CAPACIDAD CARGA ADMISILBLE S (Ton/m²) PARA B >= 1,00 m							
PROFUNDIDAD CIMENTACION	PROFUNDIDAD CIMENTACION	ZAPATAS S/TERZAGHI ANCHO CIMIENTO (m)			CIMIENTO CONTINUO S/TERZAGHI ANCHO CIMIENTO (m)		
m	pie	1.60	1.80	2.00	1.60	1.80	2.00
1.00	3.28	13.0	14.6	16.3	11.3	12.7	14.1
1.30	4.27	16.9	19.0	21.1	14.7	16.5	18.4
1.70	5.58	22.1	24.9	27.6	19.2	21.6	24.0
2.10	6.89	27.3	30.7	34.1	23.8	26.7	29.7
2.30	7.55	29.9	33.7	37.4	26.0	29.3	32.5
2.50	8.20	32.5	36.6	40.6	28.3	31.8	35.3
La información aquí reportada pertenece unicamente a la muestra analizada y no podrá ser reproducida parcial o totalmente sin la autorización escrita de INCONTECH SAS							

Nota. Adaptado de (Incotech, 2021)

En asentamientos sobre suelos arcillosos, el tiempo de respuesta es más lento en comparación con los suelos arenosos. Los factores de seguridad para todos los tipos de cimientos sobre arcillas deben ser suficientes para evitar fallas por capacidad de carga. Estos pueden ser muy reducidos para su análisis, pero deben estimarse con precisión ya que la mayoría de las estructuras

son más sensibles a las deformaciones rápidas que a los asentamientos lentos, por lo que el diseño de este tipo de suelos se guía por el criterio de asentamiento.

Cada asentamiento se considera con cargas rígidas y flexibles. Más detalladamente, se describen la teoría y los cálculos aplicados, teniendo en cuenta el módulo de Young, la relación de Poisson y la carga admisible calculada anteriormente. Según Terzaghi y Peck, el valor s se fijó en 2,5 cm creyendo que, si el límite máximo de asentamiento se limita a esa cantidad, el asentamiento diferencial entre las zapatas de la estructura estará dentro de límites tolerables (Incotech, 2021).

10. Modelo en Elementos Finitos

10.1. Modelo del edificio Alcaldía de Villavicencio

A continuación, se muestran unas vistas del actual modelo en elementos finitos la edificación objeto de estudio (Ver

Figura 8 - Figura 9), para el cual se tomó como base el plano arquitectónico del mismo y se modeló según los parámetros de carga establecidos por la norma vigente usando el software CYPECAD.

Figura 8. *Vista isométrica edificio Alcaldía de Villavicencio*

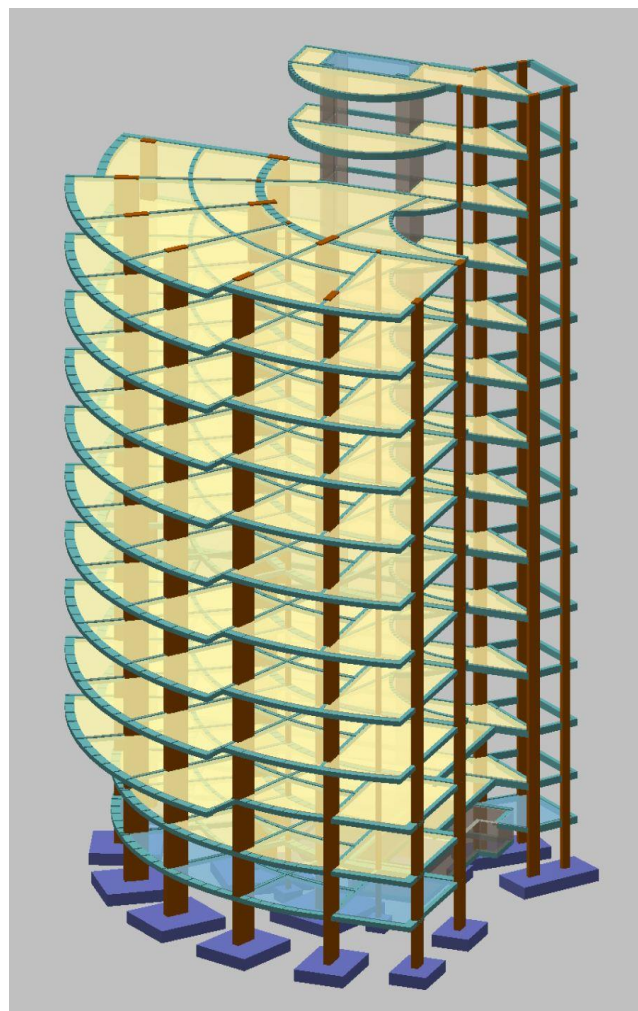
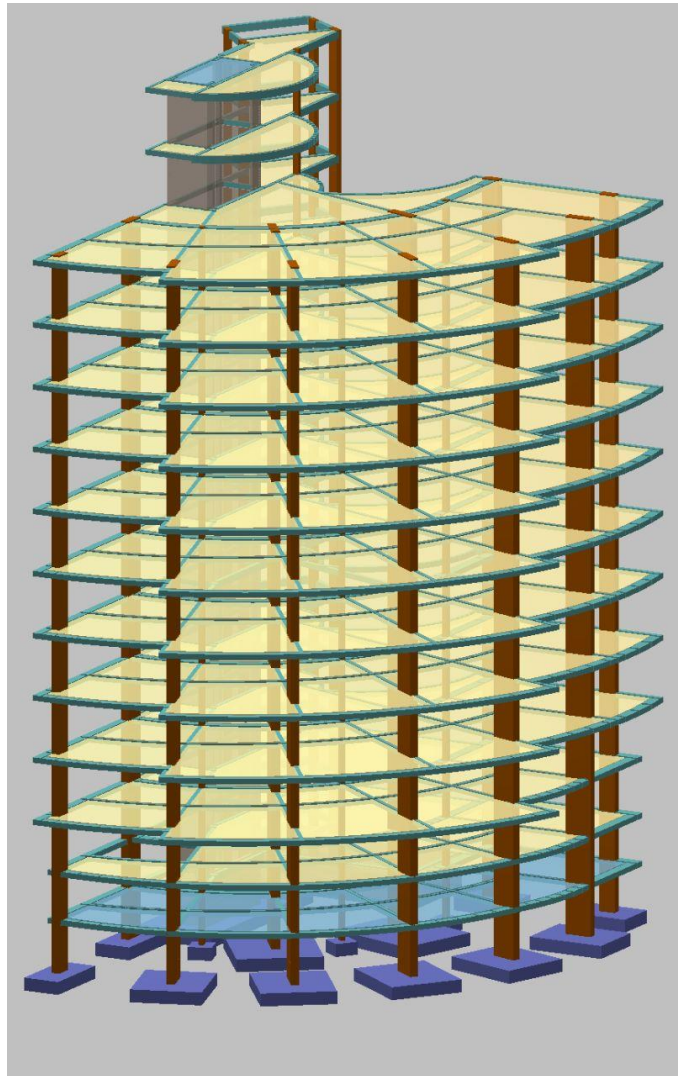
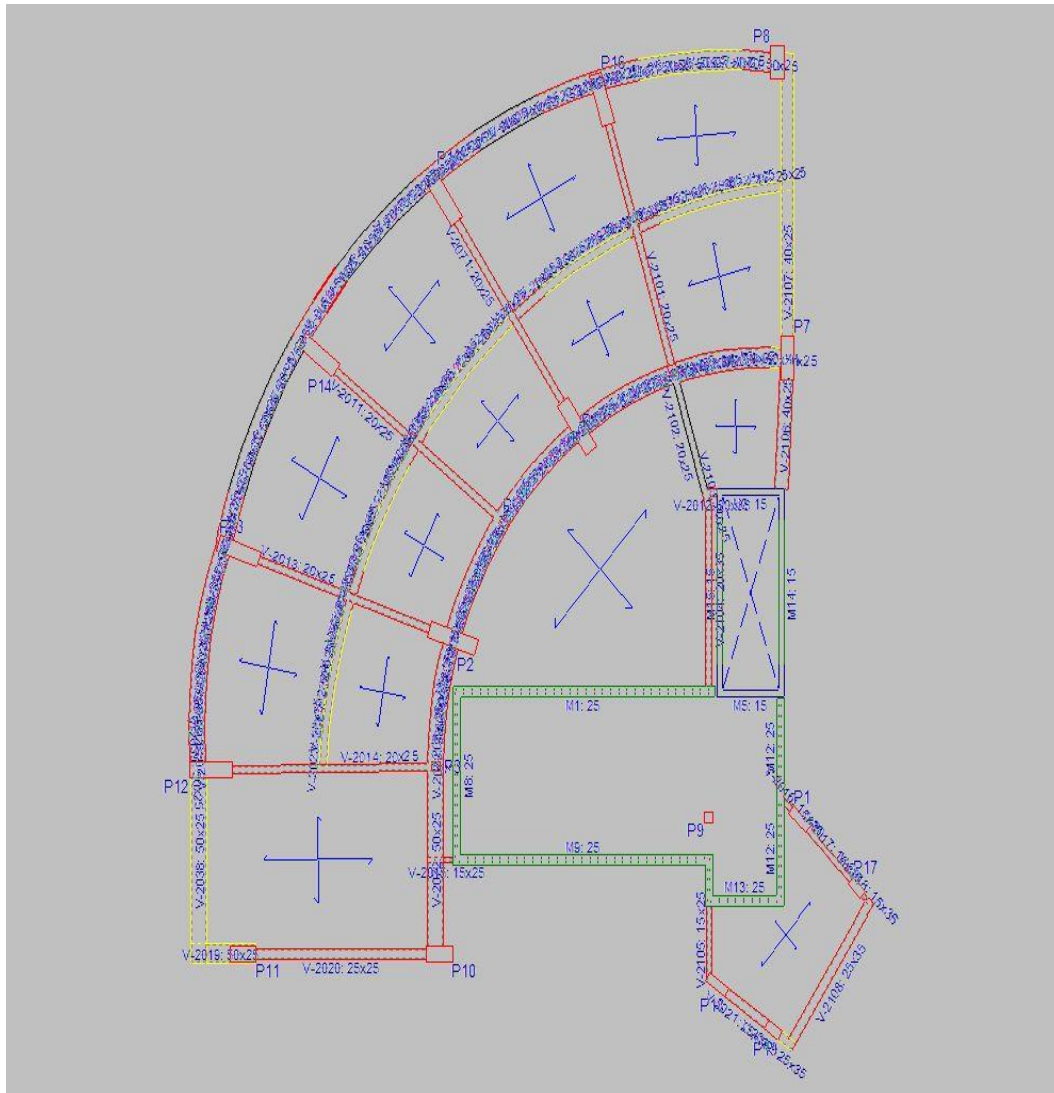


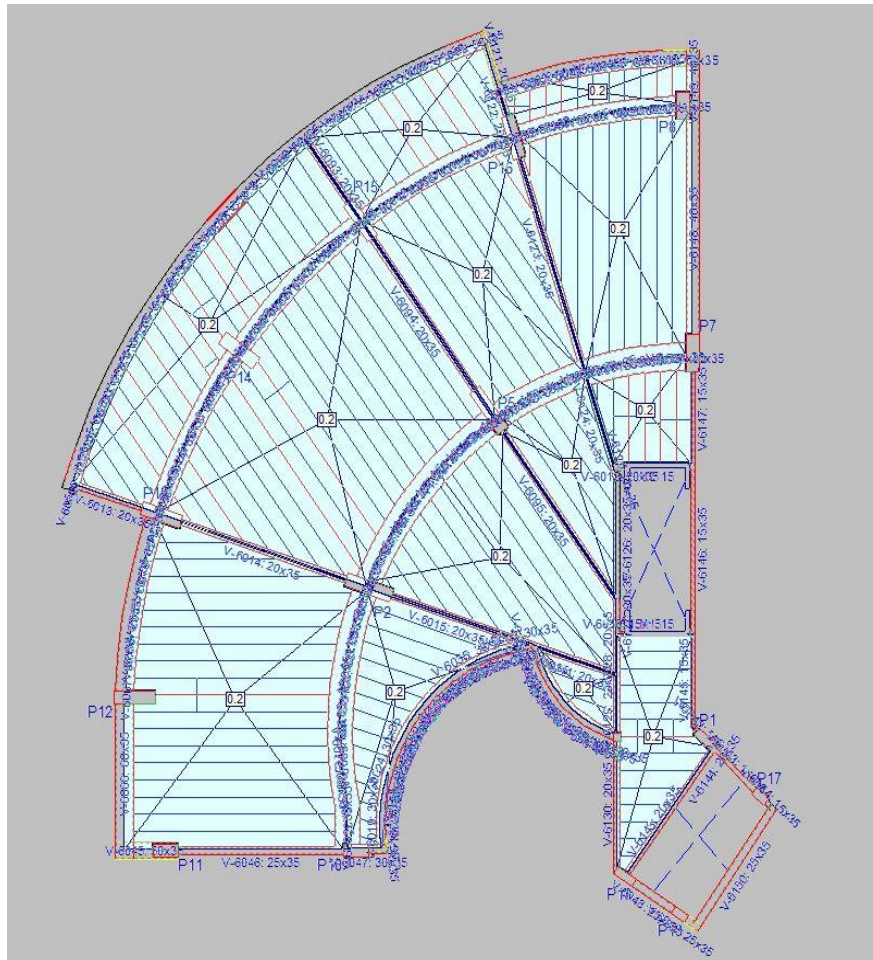
Figura 9. *Vista frontal Edificio Alcaldía de Villavicencio*

Para la modelación estructural se tuvo en cuenta tanto la normatividad vigente como las dimensiones mostradas en los planos arquitectónicos. Los parámetros de sismicidad y los valores de carga fueron tomados según los establecido por la NSR-10 para efectos de la modelación de la interacción de la estructura respecto a la cimentación descrita en los planos iniciales.

A continuación, se describirán cuáles fueron las dimensiones de vigas, columnas y muros y materiales utilizados en el modelo, según el título B de la NSR-10 donde establecen cargas vivas y muertas para edificaciones de uso de oficina. Teniendo en cuenta los entrepisos, tenemos que:

Figura 10. *Planta piso 1*

En esta vista en planta del piso, no se miran las cargas porque está a nivel del suelo, sin embargo, las vigas tienen diversas dimensiones, dentro de estas se tienen, vigas principales estas se miran en el exterior que delimitan el perímetro del edificio son de 50x25cm y las que se miran adentro que son más delgadas son de 25x25 cm.

Figura 12. *Planta Piso 2 a Piso 10*

Las dimensiones de los elementos desde piso 2 hasta piso 10, se mantienen constantes, se establecieron de 50x35 en la parte perimetral del edificio, las interiores siguen manteniéndose de 25x25cm

Tabla 5. *Dimensiones de columnas*

Elemento	Dimensión Columna	
	Ancho (cm)	Largo (cm)
P1	25	70
P2	40	150
P3	25	25
P4	25	25
P5	40	150
P6	25	25
P7	40	110
P8	40	80
P9	25	25
P10	80	40
P11	80	40
P12	40	150
P13	40	130
P14	40	130
P15	40	130
P16	40	130
P17	25	50
P18	25	70
P19	25	50

Finalmente, se muestra los datos generales de los materiales utilizados en el software CYPECAD, estos son:

Figura 14. Información generales de los materiales

Datos generales

Clave: **Modelo Alcaldía Villavicencio Cypecad**

Descripción: Modelo Alcaldía Villavicencio Cypecad

Normas: ACI 318M-08, CTE DB SE-A, CTE DB SE-M, Eurocódigo 9 y Cimentación ACI 318M-08

Hormigón armado

Hormigón

Forjados: $f_c=210$

Cimentación: $f_c=210$

Pilares: $f_c=210$

Muros: $f_c=210$

Características del árido: 15 mm

Acero

Barras: Grade 60

Pernos: B 400 S, $Y_s = 1.15$

Perfiles

Acero

Laminados y armados: S275

Conformados: S235

Madera

Vigas: C24 - Viguetas: C24 - Estructuras 3D: C24

Aluminio extruido

EN AW-5083 - F

Acciones

Carga permanente y sobrecarga de uso

Con acción de viento

Con acción sísmica NSR-10 (Colombia)

Criterio de armado por ductilidad: Especial (DES)

Elementos constructivos: No se consideran

Comprobar resistencia al fuego

Estados límite (combinaciones)

Hipótesis adicionales (cargas especiales)

Coefficientes de pandeo

Pilares de hormigón y mixtos

β_x 1.000 β_y 1.000

Pilares de acero

β_x 1.000 β_y 1.000

Aceptar

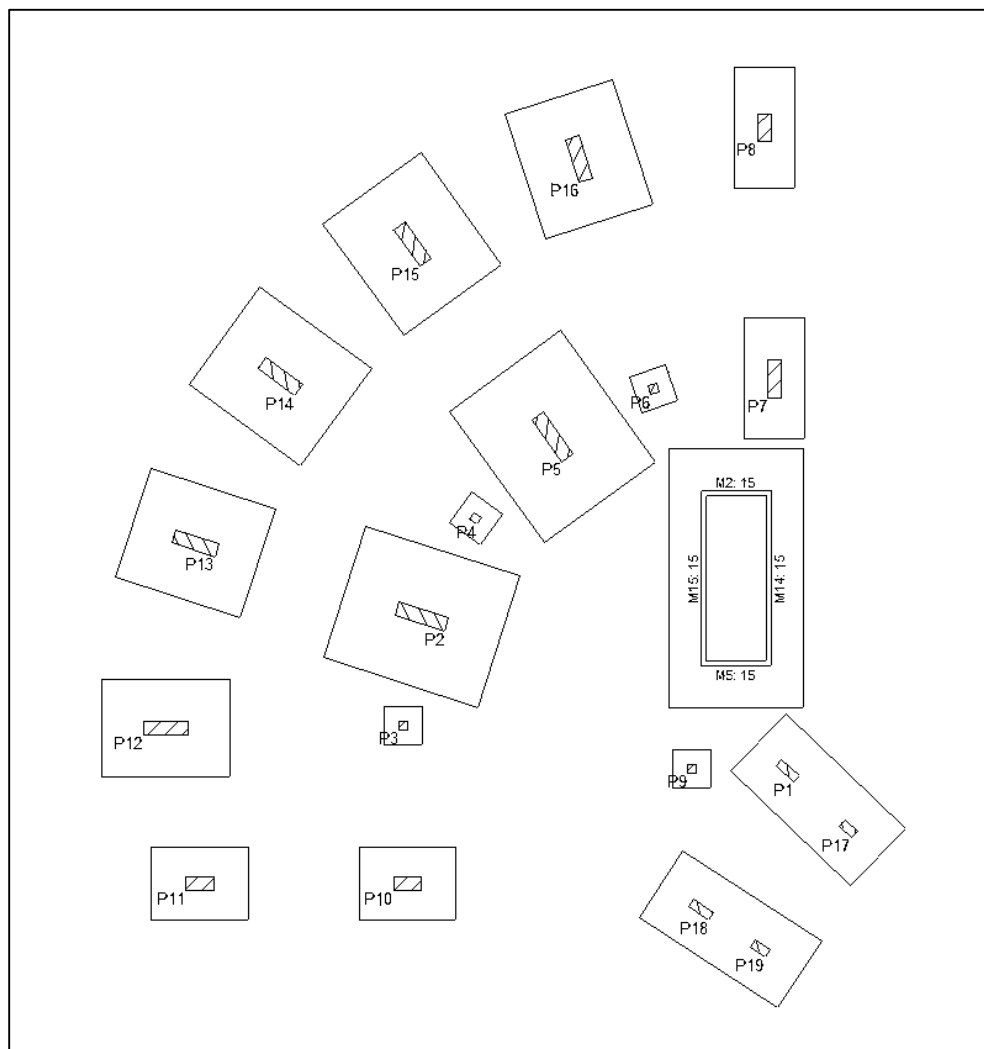
Figura 15. Vista en planta- Ubicación de la Cimentación del Edificio Alcaldía de Villavicencio

Tabla 6. *Cargas estructurales de Diseño.*

Elemento	N (kN)	Mx (kN/m)	My (kN/m)	Hx (kN)	Hy(kN)
P1	49.29	0.17	-0.33	0.51	-0.59
P2	260.24	-0.26	0.65	5.25	-1.12
P3	10.60	0.30	0.01	0.34	0.01
P4	6.00	0.39	-0.32	0.45	-0.36
P5	226.67	-1.10	2.14	1.86	-1.66
P6	6.57	0.10	-0.41	0.12	-0.47
P7	112.6	-0.17	1.21	-0.04	0.25
P8	103.58	0.10	1.53	0.28	1.56
P9	46.71	0.00	-0.02	0.01	-0.02
P10	115.45	1.01	0.11	1.78	0.04
P11	64.96	0.30	-0.38	0.77	-0.56
P12	130.15	-0.22	-0.13	1.99	-0.29
P13	170.27	-0.97	0.20	1.36	-0.66
P14	208.43	-1.44	1.07	0.49	-0.31
P15	208.50	-1.36	2.09	-0.10	0.56
P16	199.66	-1.04	3.08	-0.54	0.28
P17	11.59	-0.05	0.03	0.04	0.00
P18	53.9	-0.02	-0.21	0.26	-0.38
P19	8.33	-0.06	-0.14	0.03	-0.19

Nota. Adaptado de (Cypecad, 2018)

Para este apartado de cargas, se definen los siguientes parámetros:

- N: Es la fuerza normal que actúa sobre la zapata, es decir, la componente vertical de la carga que transmite la columna o el pilar a la cimentación.

- Mx: Es el momento flector alrededor del eje x de la zapata, es decir, la componente horizontal de la carga que produce una rotación de la zapata en el plano x-y.

- M_y : Es el momento flector alrededor del eje y de la zapata, es decir, la componente horizontal de la carga que produce una rotación de la zapata en el plano $x-z$.

- H_x : Es la fuerza horizontal que actúa sobre la zapata en dirección paralela al eje x , es decir, la componente tangencial de la carga que produce un desplazamiento de la zapata en el plano $x-y$.

- H_y : Es la fuerza horizontal que actúa sobre la zapata en dirección paralela al eje y , es decir, la componente tangencial de la carga que produce un desplazamiento de la zapata en el plano $x-z$.

10.2. Modelo Interacción Suelo-Estructura

En la siguiente tabla (Ver **Tabla 7**) se muestra una clasificación de la infraestructura aparentemente existente en la cimentación y a partir de la cual se realizarán los cálculos y la modelación de la interacción suelo estructura.

Tabla 7. *Elementos de Cimentación.*

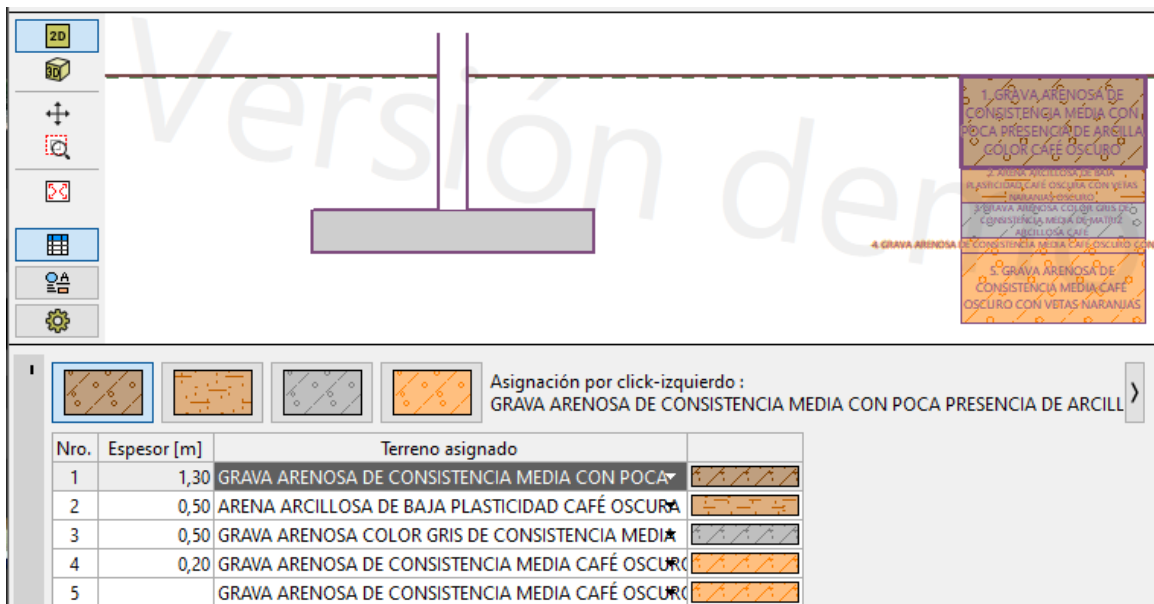
CUADRO DE ELEMENTOS DE CIMENTACIÓN	
Referencias	Dimensiones (cm)
P2 y P5	400x470
P3, P4, P6 y P9	110x110
P7 y P8	175x350
P10 y P11	280x210
P12	370x280
P13 y P16	330x380
P14 y P15	350x400
(P1-P17) y (P18-P19)	480x230

11. Cálculo de Capacidad de Carga

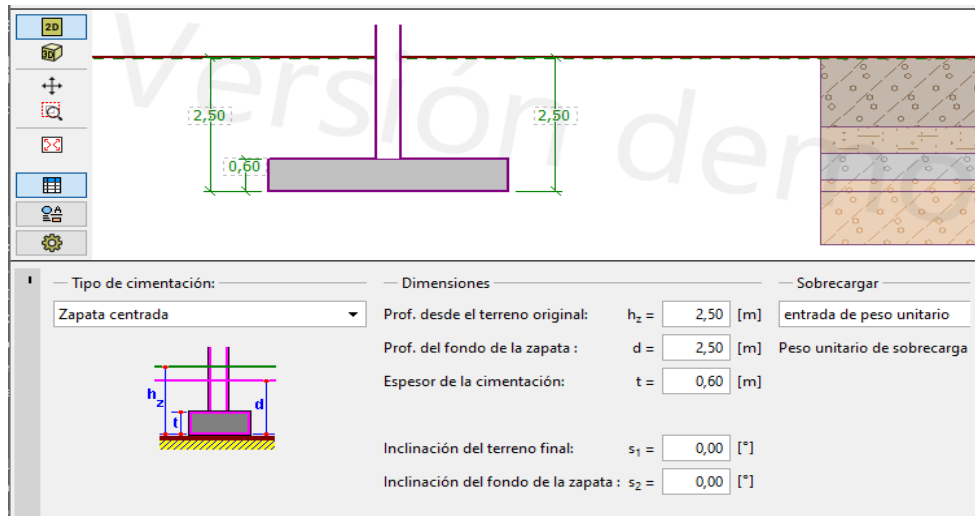
Una vez se tiene los valores de las fuerzas transmitidas por la estructura a la cimentación, así como su geometría y las características geotécnicas del suelo, se procede a modelar las zapatas aisladas haciendo uso de la versión demo del programa GEO5 para así determinar la vulnerabilidad de la cimentación de acuerdo a la verificación de la capacidad portante, y de los asentamientos del modelo. El software geotécnico GEO5 sigue una serie de pasos para el modelamiento de una zapata aislada, dicho proceso se describe a continuación usando como referencia el elemento de cimentación P2 (Ver **Tabla 7**), el cuál servirá como muestra de cálculo del proceso realizado con cada una de las zapatas como parte del análisis del presente trabajo.

Inicialmente se introdujeron los datos del perfil estratigráfico (Ver **Tabla 1**) como la profundidad de cada uno de los estratos, el material del suelo, el peso específico, el ángulo de fricción interna, la cohesión y el módulo de deformación para cada uno de los tipos de suelo hallado en el sondeo realizado (Ver **Figura 16**).

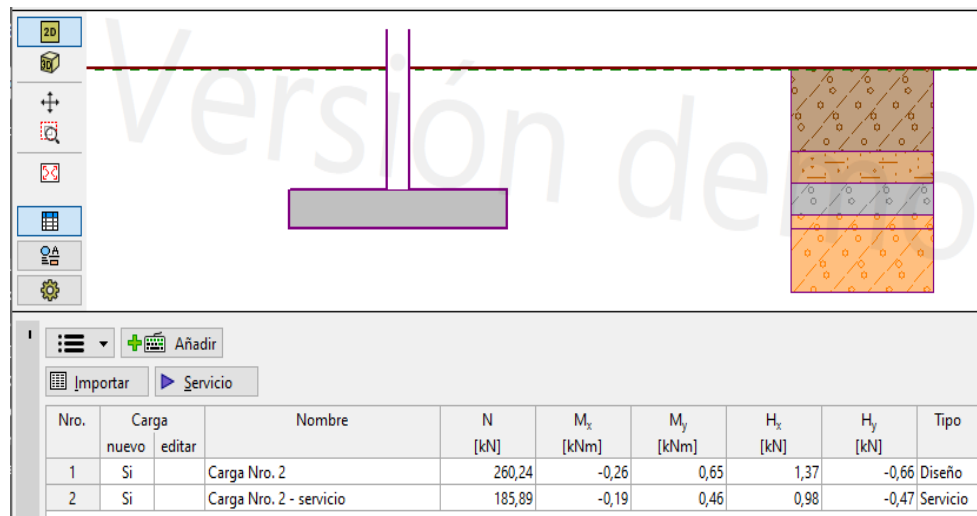
Figura 16. Asignación de perfil estratigráfico.



Posterior a esto, se determinó la profundidad de desplante de la zapata, así como es espesor de la misma (Ver **Figura 17**).

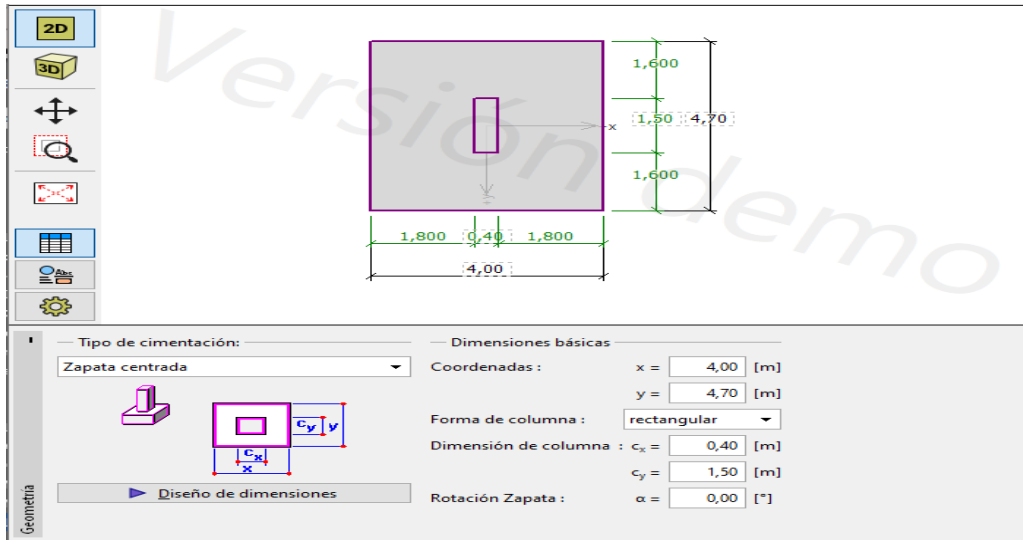
Figura 17. *Profundidad de Cimentación.*

Seguidamente se introdujeron los datos de las cargas aplicadas sobre la zapata, como la carga vertical, el momento flector y la fuerza cortante. Estos datos se tomaron del modelamiento estructural del edificio realizado en el software CYPECAD siguiendo la normativa vigente. El software brinda las cargas de diseño que se transmiten a la zapata y dividiendo entre un factor de mayoramiento se determinan las cargas de servicio para la edificación.

Figura 18. Cargas a la Cimentación.

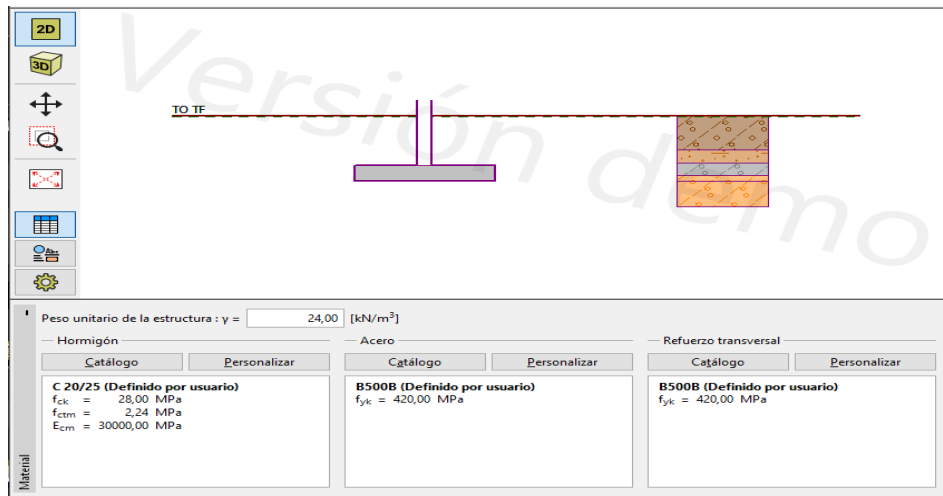
Tras esto, se insertaron los datos de la geometría de la zapata y de los elementos estructurales verticales según los planos actuales de la edificación de la alcaldía de Villavicencio, cabe resaltar que estas dimensiones no distan de las adecuadas, las mismas que fueron determinadas por el software CYPECAD en el análisis estructural (Ver **Figura 19**).

Figura 19. Geometría de la cimentación.



Luego de esto, de definieron las características de los materiales de la cimentación como lo son el acero y el concreto según los parámetros estándar de resistencia de estos materiales (Ver **Figura 20**).

Figura 20. Características materiales de cimentación

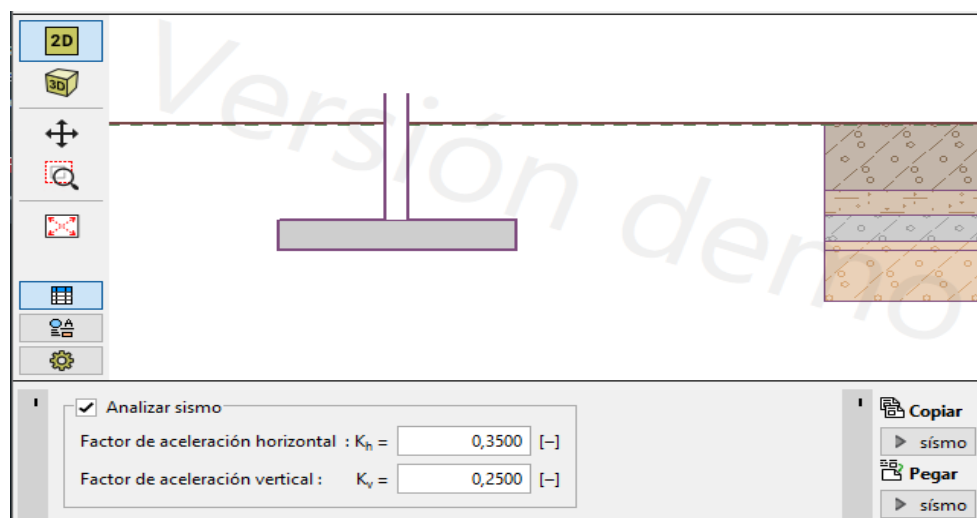


Seguido se asignan los valores sísmicos correspondientes a la aceleración horizontal y aceleración vertical determinados a partir de la zona sismogénica en la que se encuentra la ciudad de Villavicencio (Ver Tabla 3). Para la aceleración horizontal la NSR-10 en su título A, se determina un valor de 0.35 para la ciudad de Villavicencio.

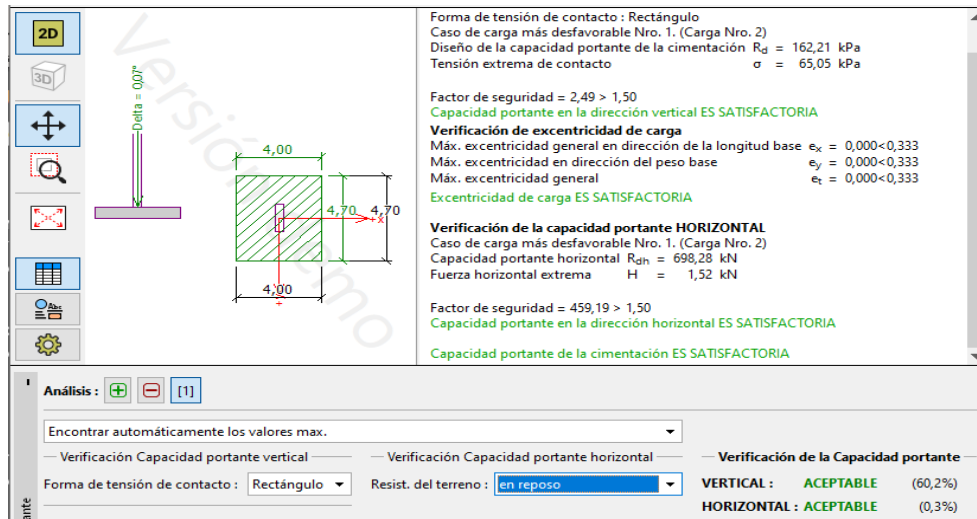
Por otro lado, según el estudio realizado en la Universidad de Industrial de Santander, el factor de aceleración vertical promedio para la ciudad de Villavicencio es de 0.25, lo que significa que la aceleración vertical máxima esperada es el 25% de la aceleración de la gravedad.

Este valor se obtuvo a partir del análisis de los registros sísmicos de los eventos ocurridos entre 1993 y 2018 en Colombia, y se comparó con los valores propuestos por la norma NSR-10 (Benjumea, Chio Cho, Angélica, & Ardila, 2022).

Figura 21. Características del sísmicas.

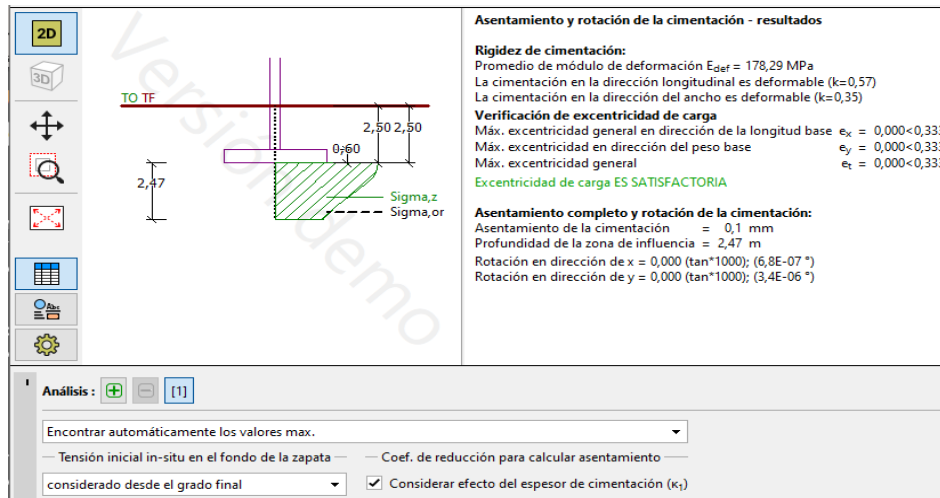


Se ejecutó el análisis y se obtuvieron los resultados de los esfuerzos en la base de la zapata, los asentamientos verticales y horizontales y la capacidad portante de la zapata según los criterios de Terzaghi, Meyerhof y Hansen (Ver **Figura 22**).

Figura 22. Verificación de capacidad portante vertical

Los resultados obtenidos mostraron que la zapata aislada cumplía con los criterios de diseño establecidos, tanto en términos de resistencia como de deformación. Los esfuerzos en la base de la zapata no superaban la capacidad portante del suelo, calculada según los métodos de Terzaghi, Meyerhof y Hansen. Los asentamientos verticales y horizontales eran aceptables y no provocaban problemas de estabilidad o de servicio (Ver **Figura 23**).

Figura 23. Verificación de asentamientos.



Nota. Adaptado de (GEO5, 2022).

Los resultados obtenidos se compararon con los valores límite establecidos por la normativa vigente y se verificó que todos los parámetros fueran satisfactorios. Así mismo, se analizaron los efectos de sitio de la ciudad, que se caracteriza por tener un suelo aluvial con baja resistencia y alta amplificación sísmica (Ramos Cañón & Alfaro Castillo, 2000).

Tabla 8. Capacidad de carga teniendo en cuenta el comportamiento las condiciones geotécnicas del sitio - Estático

Elemento	Capacidad Portante Vertical				Capacidad Portante Horizontal		
	Rd (kPa)	σ (kPa)	e_t	F.S.	Horizontal		
					R _{dh} (kN)	H (kN)	F.S.
P1	1028,17	51,73	0	19,9	331,16	0,81	410,56
P2	1222,3	65,1	0,0	18,7	698,3	1,5	459,2
P3	1117,0	60,0	0,0	18,6	51,4	0,3	151,0
P4	1105,8	56,6	0,0	19,6	48,9	0,6	84,9
P5	1220,2	63,3	0,0	19,3	680,4	2,5	272,9
P6	1110,0	56,9	0,0	19,5	49,2	0,5	101,4

Tabla 8. *Continuación*

P7	1001,9	63,3	0,0	15,8	226,6	0,3	895,0
P8	994,9	62,0	0,0	16,0	221,8	1,6	140,0
P9	1128,1	84,0	0,0	13,4	67,3	0,0	1000,0
P10	1080,7	65,2	0,0	16,6	228,3	1,8	128,2
P11	1085,3	56,4	0,0	19,3	201,4	1,0	211,6
P12	1124,3	58,1	0,0	19,4	353,2	2,0	175,6
P13	1182,6	59,4	0,0	19,9	439,1	1,5	287,8
P14	1198,9	60,8	0,0	19,7	494,3	0,6	852,5
P15	1198,5	60,9	0,0	19,7	494,4	0,6	869,1
P16	1184,6	61,8	0,0	19,2	450,7	0,6	741,0
P17	1028,17	51,73	0	19,9	331,16	0,81	410,56
P18	1028,69	51,86	0	19,8	331,87	0,64	518,93
P19	1028,69	51,86	0	19,8	331,87	0,64	518,93
Promedio	1108.88			18.63			

Tabla 9. Capacidad de carga teniendo en cuenta el comportamiento de la cimentación frente a eventos sísmicos - Dinámico

Elemento	Capacidad Portante Vertical				Capacidad Portante Horizontal		
	Rd (kPa)	σ (kPa)	e_t	F.S.	R _{dh} (kN)	H (kN)	F.S.
P1	145,58	51,73	0	2,76	331,16	0,81	410,56
P2	162,2	65,1	0,0	2,5	698,3	1,5	459,2
P3	170,6	60,0	0,0	2,9	51,4	0,3	151,0
P4	168,9	56,6	0,0	3,0	48,9	0,6	84,9
P5	161,9	63,3	0,0	2,6	680,4	2,5	276,9
P6	169,6	56,9	0,0	3,0	49,2	0,5	101,4
P7	143,9	63,3	0,0	2,3	226,6	0,3	895,0
P8	142,9	62,0	0,0	2,3	221,8	1,6	140,0
P9	172,3	84,0	0,0	2,1	67,3	0,0	1000,0
P10	155,1	65,2	0,0	2,4	229,3	1,8	128,2
P11	155,7	56,4	0,0	2,8	201,4	1,0	211,6
P12	155,9	58,1	0,0	2,7	353,2	2,0	175,6
P13	162,0	59,4	0,0	2,7	435,1	1,5	287,8
P14	163,0	60,8	0,0	2,7	494,3	0,6	852,5
P15	162,9	60,9	0,0	2,7	494,4	0,6	869,1
P16	162,3	61,8	0,0	2,6	450,7	0,6	741,0
P17	145,58	51,73	0	2,76	331,16	0,81	410,56
P18	142,65	51,86	0	2,75	331,87	0,64	518,93
P19	142,65	51,86	0	2,75	331,87	0,64	518,93
Promedio	157.14			2.63			

Donde:

Rd: Diseño de la capacidad portante de la cimentación

σ : Tensión extrema de contacto

e_t : Excentricidad General o Total

F.S.:Factor de Seguridad

R_{dh}: Diseño de la capacidad portante de la cimentación horizontal

H: Fuerza horizontal extrema

12. Cálculo de Asentamientos

En este capítulo se presentan los cálculos de asentamientos para las zapatas de cimentación propuestas con las cargas del proyecto; estos asentamientos corresponden al análisis de capacidades admisibles (estado límite de servicio).

Para el análisis del modelo de asentamientos se utilizó el software para computador PLAXIS 3D FOUNDATION que emplea el método de los Elementos Finitos para calcular los esfuerzos y deformaciones.

12.1. Asentamientos máximos permisibles

Se estableció un asentamiento máximo de 2.5 centímetros para carga de trabajo de las zapatas.

Los asentamientos diferenciales calculados se deben limitar a los valores fijados en la tabla H.4.9.1 de la NSR 2010, expresados en función de l , distancia entre apoyos o columnas de acuerdo con el tipo de construcción.

12.2. Parámetros utilizados

Para el análisis se utilizó el modelo de Mohr-Coulomb.

E = módulo de Young (kN/m^2) = 29419,95

ν = relación de Poisson = 0.30

ϕ = ángulo de fricción = 28°

c = cohesión = 0 kN/m^2

12.3. Cálculos de Carga Total

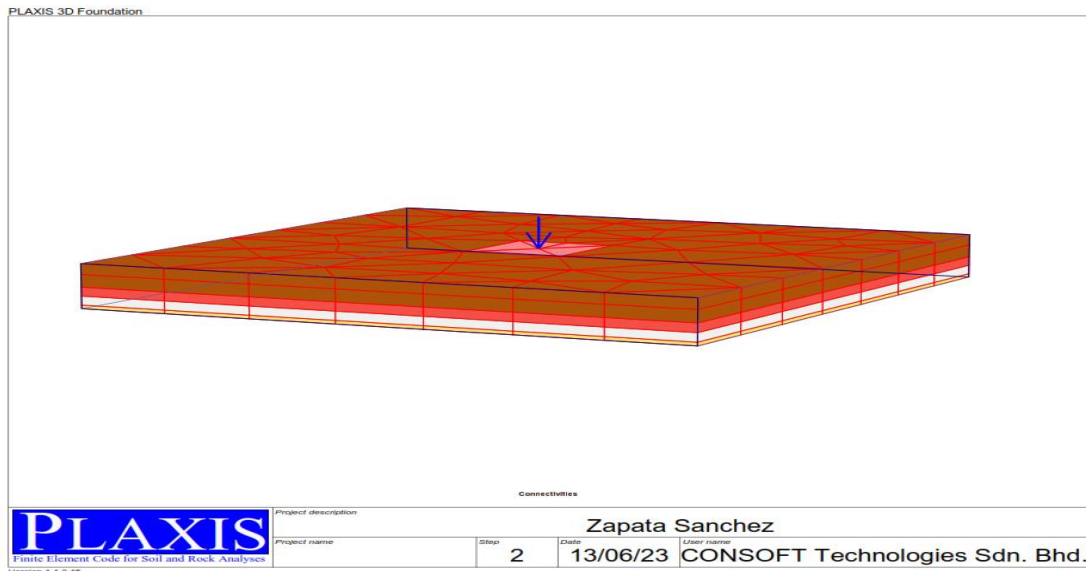
Tabla 10. *Cálculo Carga Total*

Elemento	N (kN)	Dimensión (m)		Q TOTAL transmitida a la zapata (kN*m2)	Q TOTAL trasmitida a la zapata (Ton * m2)
		B	L		
P1	49,29	4,8	2,3	544,1616	55,49
P2	260,24	4	4,7	4893	498,89
P3	10,6	1,1	1,1	12,826	1,31
P4	6	1,1	1,1	7,26	0,74
P5	226,67	4	4,7	4261,396	434,53
P6	6,57	1,1	1,1	7,9497	0,81
P7	112,6	1,75	3,5	689,675	70,33
P8	103,58	1,75	3,5	634,4275	64,69
P9	46,71	1,1	1,1	56,5191	5,76
P10	115,45	2,8	2,1	678,846	69,22
P11	64,96	2,8	2,1	381,9648	38,95
P12	130,15	3,7	2,8	1348,354	137,49
P13	170,27	3,3	3,8	2135,1858	217,72
P14	208,43	4,8	2,3	2301,0672	234,64
P15	208,5	4,8	2,3	2301,84	234,72
P16	199,66	3,3	3,8	2503,7364	255,31
P17	11,59	4,8	2,3	127,9536	13,05
P18	53,9	4,8	2,3	595,056	60,68
P19	8,33	4,8	2,3	91,9632	9,38

De acuerdo a la capacidad de carga del suelo se decidió hacer el análisis de asentamiento en una zapata rectangular de 4.0 x 4.7 metros, altura de 0.6m y una carga de 498.89 Toneladas, que tiende a ser la carga más alta de todas y la que produjo un asentamiento máximo. Para esto se definieron las propiedades del suelo, las condiciones de carga y las características del problema.

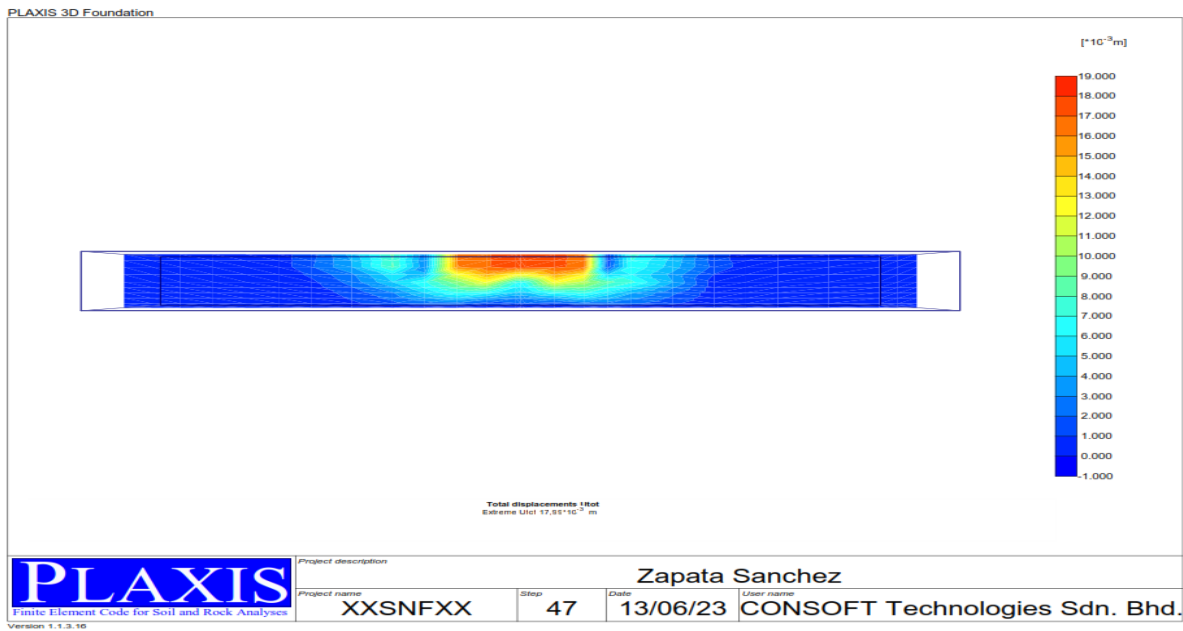
Luego se ejecutó el análisis y se registraron los valores de asentamiento calculados por PLAXIS 3D, tal y como se evidencia a continuación:

Figura 24. Modelo tridimensional.

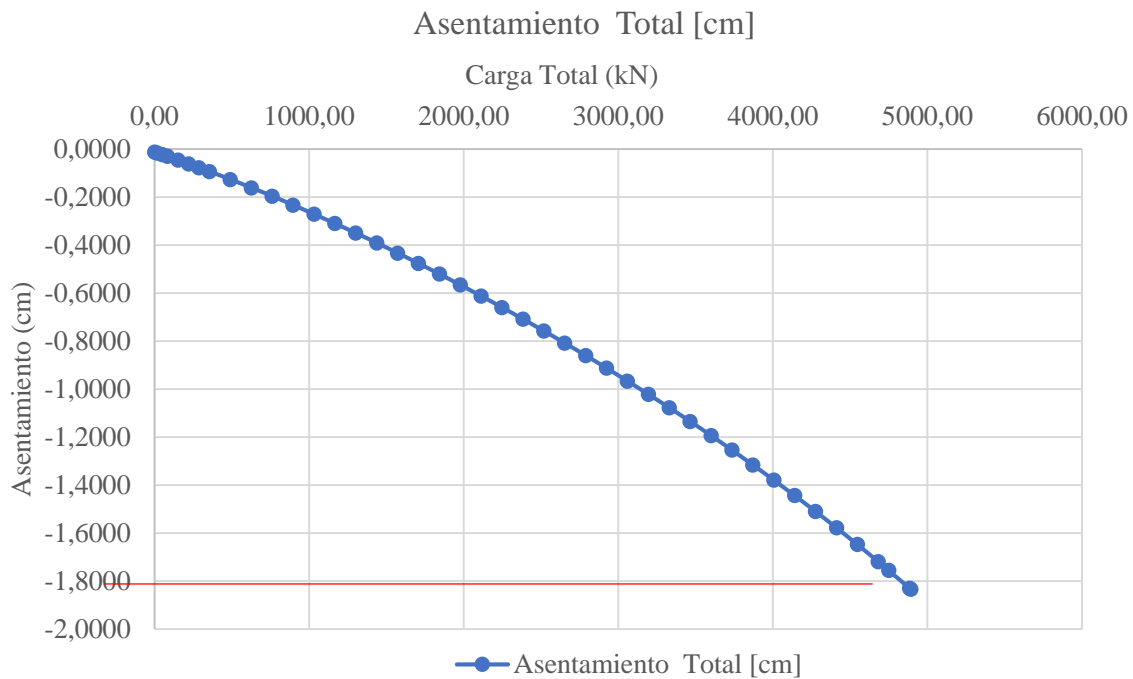


Nota. Adaptado de PLAXIS 3D

Figura 25. Deformaciones



Nota. Adaptado de PLAXIS 3D

Figura 26. *Curva de Asentamientos vs Carga*

Nota. Adaptado de PLAXIS 3D

Tabla 11. *Cálculo carga total*

Modelos de software - PLAXIS 3D
Asentamiento Máximo (cm)
1,83

Teniendo en cuenta el apartado EFECTOS DE LOS ASENTAMIENTOS del título H de la NSR-10, capítulo H.4.9.1 CLASIFICACIÓN. Se realizó el cálculo del asentamiento máximo que está definido como el asentamiento total de mayor valor entre todos los producidos en la cimentación, para este caso el asentamiento máximo esperado para una carga de 470 toneladas se estima en 1.83 cm.

Por otra parte, teniendo él cuenta el capítulo H.4.9.2. LÍMITES DE ASENTAMIENTOS TOTALES. Se hace el cálculo de los asentamientos totales calculados a 20 años limitados para construcciones aisladas a **30 cm**, dado que no se afectan la funcionalidad de conducciones de servicios y accesos a la construcción.

Tabla 12. *Cálculo límite de asentamientos totales*

Elemento	ICONTECH SAS	GEO 5
	Asentamientos en Condiciones Controladas	Modelos de Software
	Asentamiento (cm)	Asentamiento (cm)
1	0,58	0,00
2	1,16	0,01
3	1,16	0,00
4	1,16	0,00
5	1,16	0,01
6	1,16	0,00
7	0,58	0,00
8	0,58	0,00
9	1,16	0,00
10	0,58	0,00
11	0,58	0,00
12	0,58	0,00
13	1,16	0,01
14	1,16	0,01
15	1,16	0,01
16	0,58	0,01
17	0,58	0,00
18	0,58	0,00
19	0,58	0,00
Totales	16,24	0,06

En este caso el valor de asentamiento total obtenido según los datos de laboratorios es de 16.24 cm, lo que hace que este valor este dentro de los asentamientos permitidos. Del mismo modo, si comparamos el valor obtenido mediante el uso de software GEO 5, notamos que el asentamiento total es de 0.06 cm.

Con relación a lo mencionado en el capítulo H.4.9.3. LÍMITES DE ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES. Los asentamientos diferenciales calculados se limitan a los valores fijados en la **Tabla 13**, expresados en función de l , distancia entre apoyos o columnas de acuerdo con el tipo de construcción.

Tabla 13. Valores máximos de asentamientos diferencias calculados, expresados en función de la distancia entre apoyos o columnas.

Tipo de construcción	Δ_{max}
(a) Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{1000}$
(b) Edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería	$\frac{l}{500}$
(c) Edificaciones con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{300}$
(d) Edificaciones en estructura metálica, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{160}$

Para este proyecto, se considera que el tipo de construcción es definido como una edificación con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores.

Por lo tanto, se toman las diferentes elementos y su respectiva distancia entre columnas, tal y como se describe a continuación:

Tabla 14. Δ Asentamiento (asentamiento diferencial) calculado y permitido

Elementos	Δ	l	Δ
Conectados	Asentamiento	(m)	Asentamiento
	Calculado		Permitido
	(cm)		(cm)
P8 - P16	0,00	5,45	1,817

Tabla 14. *Continuación*

P16- P15	0,58	5,42	1,807
P15-P14	0,00	5,42	1,807
P14-P13	0,00	5,42	1,807
P13-P12	0,58	5,43	1,810
P12-P11	0,00	4,60	1,533
P11-P10	0,00	6,02	2,007
P10-P3	0,58	4,56	1,520
P3-P2	0,00	3,20	1,067
P2-P4	0,00	3,25	1,083
P4-P5	0,00	3,25	1,083
P5-P6	0,00	3,25	1,083
P6-P7	0,58	3,50	1,167
P1-P9	0,58	2,78	0,927
P9-18	0,58	4	1,333
P18-P19	0,00	2,05	0,683
P19-P17	0,00	4,31	1,437

13. Análisis de Resultados

13.1. Análisis del modelo y sus consideraciones

- Las vigas principales que delinear el perímetro del edificio tienen dimensiones de 50x25 cm. Estas vigas más grandes sugieren que están diseñadas para soportar cargas más significativas y transmitir las a los elementos de soporte, como columnas y cimentaciones.
- Las vigas interiores tienen dimensiones de 25x25 cm. Estas vigas más delgadas pueden estar diseñadas para soportar cargas menos significativas y redistribuir las cargas desde las vigas principales hacia las columnas y los elementos de soporte interiores.
- Vigas en el mezanine (piso 11): En el mezanine, se menciona que las vigas perimetrales tienen dimensiones de 60x35 cm, mientras que las vigas interiores tienen dimensiones de 20x35 cm. Estas dimensiones pueden indicar una mayor carga en las vigas perimetrales debido a su ubicación en el perímetro del edificio.
- Se menciona que desde el piso 2 hasta el piso 10, las dimensiones de las vigas se mantienen constantes. Las vigas perimetrales tienen dimensiones de 50x35 cm, mientras que las vigas interiores se mantienen en 25x25 cm. Estas dimensiones pueden ser adecuadas para soportar las cargas en esos niveles específicos del edificio.
- Todos los muros tienen un espesor de 15 cm, lo cual sugiere que se han utilizado muros delgados para proporcionar soporte y estabilidad estructural. Sin embargo, es importante considerar otros aspectos, como la ubicación y el diseño de los muros, para evaluar su desempeño y resistencia ante las fuerzas laterales y las cargas aplicadas, pero esto no hace parte del alcance de esta investigación.
- Se menciona que el valor de resistencia a la compresión del concreto ($f'c$) utilizado es de 21 MPa. Este valor es un indicador importante para evaluar la capacidad de carga y el comportamiento estructural de los elementos de concreto.

13.2. Análisis de la capacidad de carga

- Capacidad de carga estática: La capacidad de carga estática se refiere a la capacidad de la cimentación para soportar las cargas verticales y horizontales en condiciones normales de servicio. Teniendo en cuenta las condiciones geotécnicas del sitio, se ha determinado que la capacidad de carga estática del sistema de cimentación es adecuada para soportar las cargas aplicadas por el edificio, tal y como se evidenció en la **Tabla 8**, donde el promedio de la capacidad de carga es de 1108.88 KPa.
- Capacidad de carga dinámica: Sin embargo, al considerar el comportamiento de la cimentación frente a eventos sísmicos, se observa una reducción en la capacidad de carga. Los eventos sísmicos generan fuerzas horizontales y vibraciones que pueden afectar la estabilidad y la capacidad de carga de la cimentación. Teniendo en cuenta lo obtenido en la **Tabla 9**, el promedio de la capacidad portante de la cimentación fue de 157.14 KPa. Esta reducción en la capacidad de carga se debe a la interacción compleja entre el suelo, la estructura y las fuerzas sísmicas, que pueden generar mayores solicitaciones en el sistema de cimentación.
- Factores de seguridad indirectos: Los factores de seguridad indirectos son utilizados para considerar las incertidumbres inherentes en el proceso de diseño estructural y garantizar un nivel adecuado de seguridad. Estos factores tienen en cuenta aspectos como la variabilidad en las cargas y resistencias, las limitaciones en los métodos de análisis y los criterios de diseño.
- Cumplimiento de la NSR10: Según la tabla H.4.7-1 de la NSR10, se establece que el factor de seguridad mínimo requerido para la condición estática (Carga Muerta + Carga Viva Normal) es de 3.0. Sin embargo, el análisis realizado revela que el promedio de los factores de seguridad obtenidos, de acuerdo con la **Tabla 8**, es de 19. Esto indica un cumplimiento sustancialmente mayor al requerido por la normativa. Sin embargo, el promedio de los factores de seguridad obtenidos de 19 indica que el diseño estructural se encuentra sobre

dimensionado en relación con las cargas aplicadas. Esto implica que se ha considerado un margen significativo de seguridad en el diseño, lo cual es beneficioso para la integridad y estabilidad de la estructura.

- Por otro lado, también se observa el cumplimiento de la NSR10: Según la tabla H.4.7-1 de la NSR10, se establece que el factor de seguridad mínimo requerido para la condición dinámica (Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Pseudo estático) es de 1.5 el análisis realizado revela que el promedio de los factores de seguridad obtenidos, de acuerdo con la **Tabla 9**, es de 2.63. Esto indica un cumplimiento satisfactorio y un margen de seguridad adicional en el diseño de la estructura para hacer frente a las cargas sísmicas. Dicho margen de seguridad es adecuado para garantizar la resistencia y estabilidad de la estructura ante eventos sísmicos. El factor de seguridad superior al mínimo requerido indica un diseño estructural robusto y confiable.

13.3. Análisis de asentamientos

- El valor de asentamiento total de 15.77 cm obtenido a partir de los datos de laboratorio indica la magnitud de la deformación experimentada por la cimentación bajo la carga aplicada. Es importante destacar que este valor se encuentra dentro de los asentamientos permitidos, lo cual es un aspecto positivo.
- El valor de asentamiento total de 0.06 cm obtenido mediante el uso del software GEO 5 muestra una diferencia significativa en comparación con el valor obtenido en el laboratorio. Esta discrepancia puede deberse a varias razones, como las suposiciones y simplificaciones realizadas en el modelo numérico, las características del suelo consideradas en el análisis y las condiciones de carga aplicadas.
- Se calcularon los Δ Asentamiento (asentamiento diferencial) para cada conexión y se ha comparado con el Δ Asentamiento Permitido (valor límite) establecido. De acuerdo a lo

registrado en la **Tabla 14**, se cumple en todos los casos con el límite establecido. Esto implica que las conexiones entre los elementos del edificio cumplen con los criterios de asentamiento establecidos en la normativa.

- Es importante tener en cuenta que los criterios de aceptación y los límites establecidos en la normativa pueden no abordar específicamente el asentamiento máximo calculado. La NSR-10 y otras normativas generalmente se centran en los asentamientos diferenciales y establecen límites para garantizar la seguridad y la funcionalidad de la estructura. El asentamiento máximo calculado puede ser útil para evaluar la deformación total de la estructura y comprender cómo se comporta en términos de asentamientos. Sin embargo, su comparación directa con los criterios de aceptación y límites de la normativa puede no ser aplicable en todos los casos.

14. Conclusiones

En conclusión, a lo largo los análisis realizados, se han abordado diferentes aspectos relacionados con el diseño y análisis de un edificio utilizando herramientas como CYPECAD, Geo 5 y PLAXIS 3D. Aquí se presentan algunas conclusiones generales:

- En el diseño estructural de un edificio, es fundamental considerar las cargas que actúan sobre el mismo, tanto las cargas gravitatorias como las cargas sísmicas. Estas cargas deben ser adecuadamente calculadas y distribuidas en los elementos estructurales correspondientes.
- Los asentamientos de la cimentación son un aspecto crítico a evaluar en el diseño de un edificio. Tanto el análisis de asentamientos en condiciones controladas como en condiciones dinámicas es necesario para asegurar la estabilidad y la integridad de la estructura.
- Las herramientas de software como Geo 5 y PLAXIS 3D son útiles para modelar y analizar el comportamiento de la cimentación y los asentamientos en un edificio. Estas herramientas proporcionan resultados que pueden ser comparados con los datos de laboratorio y los criterios de aceptación establecidos por las normativas correspondientes.
- Es importante verificar que los asentamientos calculados estén dentro de los límites permitidos por las normativas aplicables. Sin embargo, también es necesario tener en cuenta otros factores de diseño, como los factores de seguridad, las condiciones geotécnicas del sitio y las características específicas del suelo.
- El monitoreo continuo de los asentamientos a lo largo del tiempo es esencial para evaluar la estabilidad a largo plazo de la estructura. Los asentamientos diferenciales excesivos

pueden causar problemas de deformación y daños en la estructura, por lo que es importante realizar un seguimiento adecuado.

En resumen, el diseño y análisis de un edificio requiere considerar diferentes aspectos, como las cargas, los asentamientos y las condiciones geotécnicas del sitio. Las herramientas de software y los criterios de normativas proporcionan una base para evaluar y verificar la estabilidad y el comportamiento del edificio, pero también es fundamental contar con datos de laboratorio confiables y realizar un monitoreo continuo.

15. Recomendaciones

- Se recomienda actualizar el diseño de la cimentación del edificio de la alcaldía de Villavicencio de acuerdo con las normas colombianas vigentes en construcción sismo resistente. Esto incluye considerar factores de carga, resistencia del suelo y dimensionamiento adecuado de la cimentación.
- Se sugiere realizar estudios geotécnicos más detallados, incluyendo la realización de más pruebas de campo y análisis de laboratorio para obtener parámetros geotécnicos más precisos. Esto permitirá una evaluación más precisa del comportamiento del suelo y una mejora en el diseño de la cimentación.
- Se recomienda realizar monitoreo estructural a largo plazo del edificio de la alcaldía de Villavicencio, con el fin de evaluar su comportamiento real y detectar posibles deformaciones, asentamientos o fallas en la cimentación. Esto ayudará a tomar medidas preventivas y de mantenimiento oportunas para garantizar la durabilidad y seguridad a lo largo del tiempo.
- Es importante promover la implementación de prácticas de construcción sismo resistente y la capacitación adecuada para los profesionales involucrados en proyectos de construcción, con el fin de asegurar el cumplimiento de las normativas y mejorar la calidad de las estructuras en la ciudad de Villavicencio.

16. Referencias Bibliográficas

- Alcaldía de Villavicencio. (2019). *Plan de Ordenamiento Territorial*. Obtenido de <http://historico.villavicencio.gov.co/MiMunicipio/ProgramadeGobierno/Plan%20de%20Desarrollo%20Villavicencio%20Cambia%20Contigo%202020%20-%202023.pdf>
- Alcaldía de Villavicencio. (2023). *Alcaldía de Villavicencio*. Obtenido de <http://historico.villavicencio.gov.co/NuestraAlcaldia/Paginas/Directorio-de-Dependencias.aspx>
- Angulo Luna, L. J. (1 de Enero de 2017). Análisis sísmico de un edificio de siete pisos con sótano utilizando interacción suelo-estructura en el distrito de San Juan de Lurigancho. [*Trabajo de grado, Universidad Cesar Vallejo*]. *Repositorio*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/9925>
- Benjumea, J. M., Chio Cho, G., Angélica, F., & Ardila, J. (3 de Junio de 2022). Acceleration Amplitude of the Vertical Component of Colombian Earthquakes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 32(1), 1-16. Obtenido de Universidad Industrial de Santander: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/5817>
- Calle Gallegos, S. A. (2011). Estudio de la interacción suelo-estructura y vulnerabilidad sísmica de la catedral de la Inmaculada Concepción de la ciudad de Cuenca; efecto de la incorporación del suelo de fundación en su respuesta estructural. [*Trabajo de grado, Universidad de Cuenca*]. *Repositorio*. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/738>
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Pearson.
- CYPE Ingenieros. S.A. (2018). *CYPE Software para Arquitectura, Ingeniería y construcción*. Obtenido de <http://www.cype.es/cypeingenieros/>
- Cypecad. (2018). *Software cypecad*. Obtenido de <http://www.cype.es/cypeingenieros/>
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.
- GEO5. (2022). *Software Geotécnico - GEO5*. Obtenido de <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/>
- Google Earth. (Abril de 2022). Obtenido de <https://earth.google.com/web/@4.1378931,-73.62485207,434.2915548a,10309.39026176d,35y,356.29683251h,0t,0r>

- Incotech. (2021). *Estudio de suelos parqueadero bolivar*. Incotech.
- Mata Lemus, R. D. (1 de Marzo de 2015). Efectos de la acción sísmica, en edificaciones regulares de concreto armado considerando la interacción suelo-estructura de manera explícita para suelos arenosos y arcillosos. [*Trabajo de grado, Universidad de Carabobo*]. Repositorio. Obtenido de <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/952810>
- Meza Rodríguez, J. A., & Valderrama Carpio, C. J. (1 de Diciembre de 2014). Influencia De La Interacción Suelo-Estructura En La Reducción De Esfuerzos De Una Edificación Aporticada Con Zapatas Aisladas. [*Trabajo de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*]. Repositorio. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/346266>
- Meza Soto, M. J. (2020). Estimación del cambio del módulo resiliente de la subrasante por efectos del clima en arcillas blandas del norte de Bogotá. [*Repositorio Digital, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*]. Repositorio. Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1246?locale-attribute=en>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente NSR-10 Tomo I. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Obtenido de https://www.andi.com.co/Uploads/Reglamento_colombiano_construccion_sismo_resistente_636536179523160220.pdf
- Moreno De Luca, L. (1 de Enero de 2010). Efectos asociados con la interacción suelo-estructura en el diseño de edificaciones de concreto reforzado en Bucaramanga. [*Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander*]. Repositorio. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/136423.pdf>
- Mori Infante, M., & Tori Tori, F. L. (1 de Enero de 2020). Evaluación de la respuesta sísmica de una edificación de concreto armado con cimentación rígida en el distrito de Lince considerando los efectos de la interacción suelo – estructura. [*Trabajo de grado, Universidad San Ignacio de Loyola*]. Repositorio. Obtenido de <https://repositorio.usil.edu.pe/browse/type?value=info:eu-repo%2Fsemantics%2FbachelorThesis>
- Periodico del Meta. (26 de julio de 2022). *Fotografía tomada por la redacción del periodico*. Obtenido de <https://periodicodelmeta.com/>

- Ramírez Linares, J. E. (2022). Reforzamiento estructural con fibra de carbono edificio parque santander. [Artículo de investigación, Universidad Santo Tomás]. Repositorio. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/49743>
- Ramos Cañón, A. M., & Alfaro Castillo, A. J. (2000). *Fuentes sismogénicas y deslizamientos en Villavicencio para la microzonificación sísmica*. Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/34037>
- Villareal Castro, G. (1 de Enero de 2009). *Interaccion suelo-estructura en edificios altos*. Obtenido de https://www.academia.edu/5328319/INTERACCION_SUELO_ESTRUCTURA_EN_EDIFICIOS_ALTOS