

RIESGOS DE CONSTRUCCIÓN EN EDIFICIOS DE BOGOTÁ SECTOR EL LAGO

MAURICIO FORERO DUARTE

ING. AURORA VELASCO RIVERA. MSc.



**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C., ABRIL DE 2025**

RIESGOS DE CONSTRUCCIÓN EN EDIFICIOS DE BOGOTÁ SECTOR EL
LAGO

MAURICIO FORERO DUARTE

ING. AURORA VELASCO RIVERA. MSc.



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C., ABRIL DE 2025

Nota aceptación

Firma de tu

Ximora Lasco R

a MSc.

Firma de jurado 1: Ing Jaime Duran García

Firma de jurado 2: Luz Piedad Gallego Osorio.

Bogotá D. C., abril de 2025

DEDICATORIA

A mi abuela y a mi madre,

Este trabajo es dedicado a ustedes, que con resiliencia y sabiduría me enseñaron a afrontar este camino hasta culminarlo. A ustedes, a quienes les debo ese apoyo incondicional que solo las madres saben dar, y que nos enseñan a nosotros, sus hijos, a seguir adelante pese a las dificultades.

El camino ha sido largo, pero la recompensa de verlas felices y orgullosas es lo que más me motiva, incluso cuando la vida y las complicaciones en su salud siguen desgastándolas con el tiempo. Siéntanse orgullosas, porque cada voz de aliento fue mi impulso para terminar esta etapa.

Este no es el último logro académico, y ojalá la vida les permita acompañarme mucho más, para que sigamos celebrando juntos.

Con todo mi amor.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a cada persona que estuvo compartiendo conmigo durante esta etapa, compañeros de clases, amigos y colegas.

Agradecimiento al profesor y director del programa Diego Palma y profesora Luz Piedad Gallego por brindarme la oportunidad de finalizar pese a las circunstancias.

A la profesora Aurora Velasco por su inmensa colaboración en el final del proceso, su motivación, inmensa sabiduría y persistencia ayudó para alcanzar el mismo.

Al ingeniero Juan Carlos Barrera, por darme la oportunidad de iniciar con el proceso profesional y enriquecer mis conocimientos.

CONTENIDO

1. PROBLEMA	12
2. DELIMITACIÓN.....	12
3. OBJETIVOS	12
4. ANTECEDENTES	13
5. JUSTIFICACIÓN	33
6. MARCO REFERENCIAL	34
7. METODOLOGÍA.....	39
8. CONCLUSIONES.....	40
9. RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	42

Lista de figuras

Figura 1: Mapa geotécnico (INGEOMINAS, 1997)	15
Figura 2: Zonas Geotécnicas, (DPAE, 2010)	16
Figura 3: Mapa Interactivo geotécnico de Bogotá, IDECA	18
Figura 4: Diagrama explicativo de colapso caisson, Centro 93.....	20
Figura 5: Edificio barrio El Polo, Avenida Calle 80 x Carrera 30. Fotografía tomada el 02/04/2025 en donde se observa el ángulo de inclinación con la vertical debido al asentamiento diferencial.	22
Figura 6: Fotografía tomada en la Carrera 29 con Avenida Calle 80. 02/04/2025. Se observa la inclinación tanto vertical como horizontal producto del cabeceo del edificio hacia la zona interna del conjunto.	23
Figura 7: <i>Estratigrafía y Comportamiento de edificios A y B. Caso de Estudio Maestría.</i>	24
Figura 8: Solución propuesta para detener el movimiento en el costado norte con pilotes y acelerar el asentamiento del costado sur.	25
Figura 9: Foto ilustrativa del "Diluvio de San Mateo"	26
Figura 10: Mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México.....	27
Figura 11: Los daños físicos más visibles de la Catedral debido a los hundimientos diferenciales han sido las grietas en muros y el levantamiento del piso de mármol en las naves procesionales.....	29
Figura 12: Monumento Ángel de la Independencia, Ciudad de México (1910 – 2013).....	30
Figura 13: Estratigrafía del subsuelo y desniveles de la superficie.....	31
Figura 14: Zonas donde se realizaron lumbreras para excavación de arcillas.....	32
Figura 15: Proceso de subexcavación.	33
Figura 16: Curva de consolidación.....	35
Figura 17: Clasificación de Agua en el suelo de Crespo Villalaz.	37

Lista de tablas

Tabla 1: Descripción de las zonas geotécnicas, (DPAE, 2010)	17
--	----

GLOSARIO

- **Asentamiento:** proceso de compactación y hundimiento del suelo debido a la interacción estructura-suelo producido por cargas.
- **Asentamientos diferenciales:** problema que presenta una estructura o edificación en la parte de la cimentación cuando se asienta de manera desigual sobre el suelo.
- **Cimentación:** base o fundación de una estructura, como un edificio o carretera, que soporta y transmite las cargas de la construcción al suelo.
- **Consolidación de suelos:** proceso por el cual se reduce el volumen del suelo y adquiere firmeza al aplicarse cargas estáticas.
- **Nivel freático:** es la profundidad a la cual se encuentra el agua subterránea en relación con la superficie del suelo.
- **Subsidencia:** hundimiento progresivo de la superficie del terreno como consecuencia de trabajos en minería, colapso de cavidades subterráneas, extracción de agua o de petróleo, o desecación.
- **Suelos lacustres:** formados por depósitos lacustres, es decir, por los sedimentos que se depositan en los lagos y luego quedan expuestos.

RESUMEN

La ingeniería civil tiene que desarrollar metodologías interpretativas que permitan mitigar los riesgos geotécnicos. Los riesgos geotécnicos aparecen cuando, por omisión, se desarrollan obras y estructuras que se apoyan sobre suelos cuyas particularidades de su formación necesitan de estudios adicionales y su respectiva evaluación, ya que podrían inducir inestabilidad en las construcciones.

Teniendo en cuenta que los suelos lacustres, caracterizados por su alta compresibilidad, elevado contenido de humedad y predominancia de arcillas blandas, representan uno de los mayores desafíos para la ingeniería civil debido a su susceptibilidad a fenómenos como asentamientos diferenciales, subsidencia y consolidación de suelos. Estos problemas comprometen la estabilidad de edificaciones e infraestructuras en ciudades construidas sobre antiguos sistemas lacustres, como Bogotá y la Ciudad de México, donde existen casos conocidos y emblemáticos (edificios en barrio El Polo y barrio El Lago en Bogotá; Catedral Metropolitana y Ángel de la Independencia en México) evidencian grietas, inclinaciones y hundimientos progresivos. Aunque existen normativas (NSR-10) y técnicas de mitigación (pilotes de fricción, subexcavación controlada), persisten las fallas en estudios geotécnicos exhaustivos, monitoreo del nivel freático y planificación urbana sostenible.

Este trabajo analiza las causas y soluciones de estos fenómenos mediante una metodología descriptiva-analítica, revisión bibliográfica y estudio de casos comparativos. Se identifican las características geotécnicas de los suelos lacustres y se proponen medidas correctivas con la actualización de mapas geotécnicos. La investigación menciona la necesidad de proteger humedales, regular extracciones de agua subterránea e implementar diseños estructurales adaptativos, contribuyendo a la gestión del riesgo geotécnico en contextos urbanos vulnerables.

INTRODUCCIÓN

Los suelos lacustres son uno de los mayores retos que enfrenta la ingeniería civil, y esto se debe a sus características geotécnicas únicas: son altamente compresibles, tienen un alto contenido de humedad y están compuestos de arcillas blandas. Estas propiedades los hacen muy sensibles a las cargas estructurales y a los cambios en el nivel freático, lo que puede provocar problemas como asentamientos diferenciales, subsidencia y consolidación. Todo esto pone en riesgo la estabilidad de edificios e infraestructuras urbanas. Ciudades como Bogotá y la Ciudad de México, que se han construido sobre antiguos sistemas lacustres, son ejemplos claros de los peligros que conllevan estos suelos. En estas áreas, edificios emblemáticos y zonas enteras han sufrido hundimientos, grietas e inclinaciones que afectan su funcionalidad y seguridad.

En Bogotá, los edificios en los barrios El Polo y El Lago son un claro reflejo de estos problemas. La falta de estudios geotécnicos detallados, el descenso del nivel freático y la expansión urbana sobre humedales han acelerado los problemas de subsidencia. De manera similar, en la Ciudad de México, estructuras icónicas como la Catedral Metropolitana y el Monumento al Ángel de la Independencia han necesitado intervenciones complejas para abordar los asentamientos diferenciales provocados por la extracción de aguas subterráneas y las características del subsuelo. A pesar de los avances en normativas y técnicas de cimentación—como pilotes de fricción, losas flotantes y subexcavación controlada—, aún hay fallas en la implementación de medidas preventivas y correctivas, así como en la consideración de los impactos hidrogeológicos en el diseño urbano.

Este trabajo tiene como objetivo analizar las principales causas de los asentamientos diferenciales, la subsidencia y la consolidación en suelos lacustres, utilizando como referencia los casos de Bogotá y otras regiones del mundo que presentan condiciones geotécnicas similares. A través de una metodología descriptiva-analítica y el estudio de casos documentados, se evaluarán las soluciones existentes y se propondrán medidas de mitigación efectivas que ayuden a reducir el impacto de estos fenómenos en las estructuras urbanas. La investigación se basa en una revisión bibliográfica de estudios previos, normativas vigentes (NSR-10) y experiencias prácticas, con el propósito de ofrecer un marco de referencia que guíe futuras intervenciones en zonas lacustres.

La importancia de este estudio radica en su contribución a la gestión del riesgo geotécnico en ciudades con suelos blandos, donde el crecimiento urbano descontrolado y la falta de planificación aumentan la vulnerabilidad de las edificaciones. Al entender las dinámicas de los suelos lacustres y las mejores prácticas para su manejo, se podrán desarrollar estrategias más sostenibles que logren equilibrar el desarrollo urbano con la preservación del medio ambiente y la seguridad estructural.

1. PROBLEMA

La ciudad de Bogotá y otras áreas del mundo con suelos lacustres enfrentan retos importantes en el campo de la ingeniería civil. Esto se debe a fenómenos como los asentamientos diferenciales, subsidencia y consolidación de suelos. Estos problemas surgen de las características geotécnicas de estos suelos, que son altamente compresibles, tienen un alto contenido de humedad y están compuestos por arcillas blandas. Todo esto los hace especialmente vulnerables a las cargas estructurales y a las variaciones en el nivel freático.

En Bogotá, se pueden observar casos como los edificios en el barrio El Polo y El Lago, donde los efectos de estos fenómenos son evidentes, con estructuras que muestran inclinaciones, grietas y hundimientos progresivos. De manera similar, en la Ciudad de México, construcciones icónicas como la Catedral Metropolitana y el Monumento al Ángel de la Independencia han experimentado serios asentamientos diferenciales, en gran parte debido a la extracción de aguas subterráneas y las características del subsuelo lacustre.

A pesar de los avances en normativas y técnicas de cimentación, como los pilotes de fricción, las losas flotantes y la subexcavación controlada, aún hay fallas en la implementación de estudios geotécnicos exhaustivos, en el monitoreo del nivel freático, información sobre subsidencia y en la consideración de los impactos hidrogeológicos en el diseño de estructuras. Además, la expansión urbana sobre zonas de humedales y la construcción de grandes infraestructuras en Bogotá, aumentan el riesgo de subsidencia y asentamientos diferenciales no anticipados.

De acuerdo con lo anterior, en el presente estudio se busca responder la pregunta: ¿Cuáles son las causas principales de los asentamientos diferenciales, la subsidencia y la consolidación en suelos lacustres de Bogotá? ¿Qué soluciones o medidas de mitigación se pueden implementar para reducir su impacto en los edificios y la infraestructura urbana?

2. DELIMITACIÓN

El presente estudio se refiere al análisis de asentamientos diferenciales, subsidencia y consolidación en suelos lacustres de Bogotá.

3. OBJETIVOS

A continuación, se presentan el objetivo general y los objetivos específicos.

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar algunos estudios realizados para la ciudad de Bogotá donde se interpretan las causas y soluciones que deben ser implementadas para mitigar los problemas de asentamientos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características geotécnicas del suelo lacustre en la ciudad de Bogotá, barrios El Polo y El Lago.
- Analizar los problemas que se presentan con asentamientos diferenciales, subsidencia y consolidación del suelo.
- Evaluar estudios previos y la normativa aplicable para los fenómenos presentes.
- Proponer soluciones o medidas de mitigación al problema identificado.

4. ANTECEDENTES

Los asentamientos diferenciales son un problema recurrente en distintas ciudades del mundo, especialmente en aquellas que cuentan con suelos de alta compresibilidad o han experimentado modificaciones geotécnicas. Para el presente trabajo, Bogotá y Ciudad de México han registrado múltiples casos de edificaciones y obras civiles que han sufrido de asentamientos comprometiendo la seguridad y estabilidad de las mismas.

Representan un fenómeno significativo en la ingeniería civil, particularmente en áreas urbanas con características geotécnicas complejas, como es el caso de ciudades en constante crecimiento como Bogotá y Ciudad de México. Estos asentamientos, que se producen debido a la variabilidad en las propiedades del suelo y a factores como la sobrecarga estructural, el uso de materiales inadecuados y la extracción de agua subterránea, pueden generar daños estructurales importantes en las edificaciones y afectar la seguridad de los habitantes. En este contexto, el estudio de los asentamientos diferenciales cobra relevancia, ya que su comprensión y prevención son fundamentales para garantizar la estabilidad de las infraestructuras urbanas.

Thomas Van Der Hammen describe de manera resumida en el libro "Plan Ambiental de la Cuenca Alta del Río Bogotá" en 1998, que hace 100 millones de años, la sabana de Bogotá se encontraba sumergida bajo el mar, allí se depositaron sedimentos marinos, arcillas y arenas. En la época del Cretáceo, la región sufrió

cambios geológicos, entre ellos la formación de domos de sal para conformar Zipaquirá y Nemocón. (Hammen, 1998).

Hace 65 millones de años, en la época del Terciario, el mar se retiró convirtiéndose en una planicie costera con depósitos fluviales y pantanosos, formando turbas que posteriormente dieron origen a los mantos de carbón. Movimientos tectónicos generaron cerros bajos y depósitos sedimentarios como la formación de la ciudad de Bogotá, zona conocida como la Regadera y Usme. (Hammen, 1998).

Entre 10 y 6 millones de años atrás, la Cordillera Oriental comenzó a elevarse, cerrando la conexión entre el Valle del Magdalena y los Llanos Orientales. Durante este proceso, ocurrieron deslizamientos y corrientes de lodo que dieron origen a la formación Marichuela. Hace 3 millones de años, la elevación de la cordillera finalizó y la Sabana de Bogotá se convirtió en una cuenca cerrada. El agua acumulada formó una gran laguna, cuyos sedimentos se encuentran en las formaciones de Subachoque y Sabana. (Hammen, 1998).

Desde hace 2.5 millones de años, la época del Cuaternario trajo ciclos de glaciaciones e interglaciaciones. Durante las glaciaciones, la Sabana era un páramo frío con fauna como mastodontes y caballos americanos. La última glaciación finalizó hace 10,000 años, dando paso al Holoceno, con el desarrollo de bosques andinos y humedales. (Hammen, 1998).

Las erupciones volcánicas de la Cordillera Central depositaron cenizas que formaron suelos fértiles (Andisoles). Estos cambios geológicos influyeron en la formación del paisaje actual de la Sabana y tienen una relación directa con el impacto ambiental de la actividad humana. (Hammen, 1998).

En octubre de 2010, el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE) publicó el informe final sobre la Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá para el Diseño Sismo Resistente de Edificaciones. Este documento incluye, entre otras herramientas, la microzonificación sísmica de la ciudad.

Para su elaboración, se tomaron como base las zonificaciones geotécnicas de 1988 y 1995, las cuales se fundamentaron en el mapa geológico de Bogotá, aproximadamente 40 exploraciones profundas, cientos de sondeos someros y descripciones estratigráficas de pozos de agua. Ver figura 1. (FOPAE, 2010).

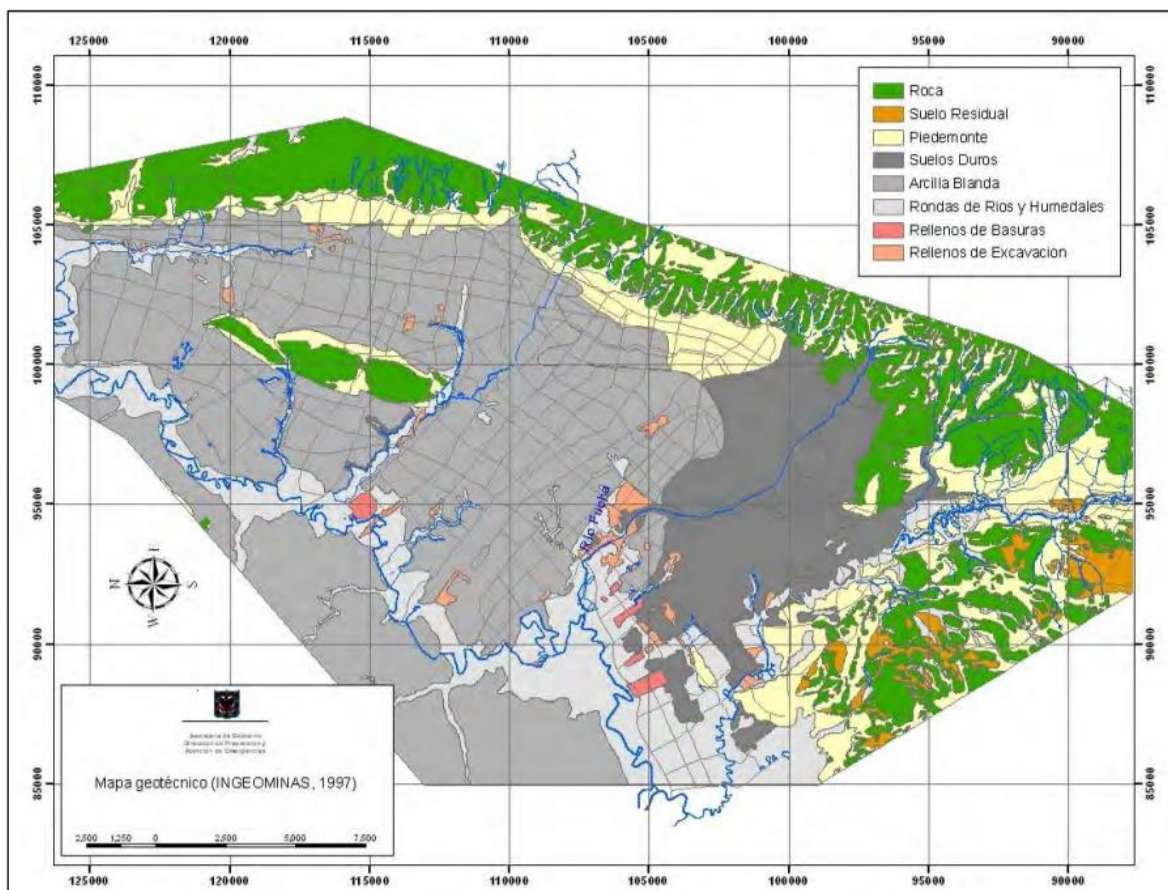


Figura 1: Mapa geotécnico (INGEOMINAS, 1997)

Fuente: Fondo de Prevención. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismoresistente de edificaciones, 2010. Pág. 42.

En la actualización del mapa geotécnico de Bogotá en octubre de 2010 (ver figura 2), el DPAE incorporó diversas exploraciones, incluyendo las del estudio de la Microzonificación Sísmica de Bogotá (MZSB), así como datos suministrados por UNIANDES para la línea del metro, la Sociedad Colombiana de Geotecnia SCG y estudios sobre efectos locales.

A través de la colaboración entre la SCG, DPAE y UNIANDES, se compiló esta información, permitiendo identificar las características geotécnicas del subsuelo y determinar algunos parámetros geomecánicos clave (ver tabla 1).

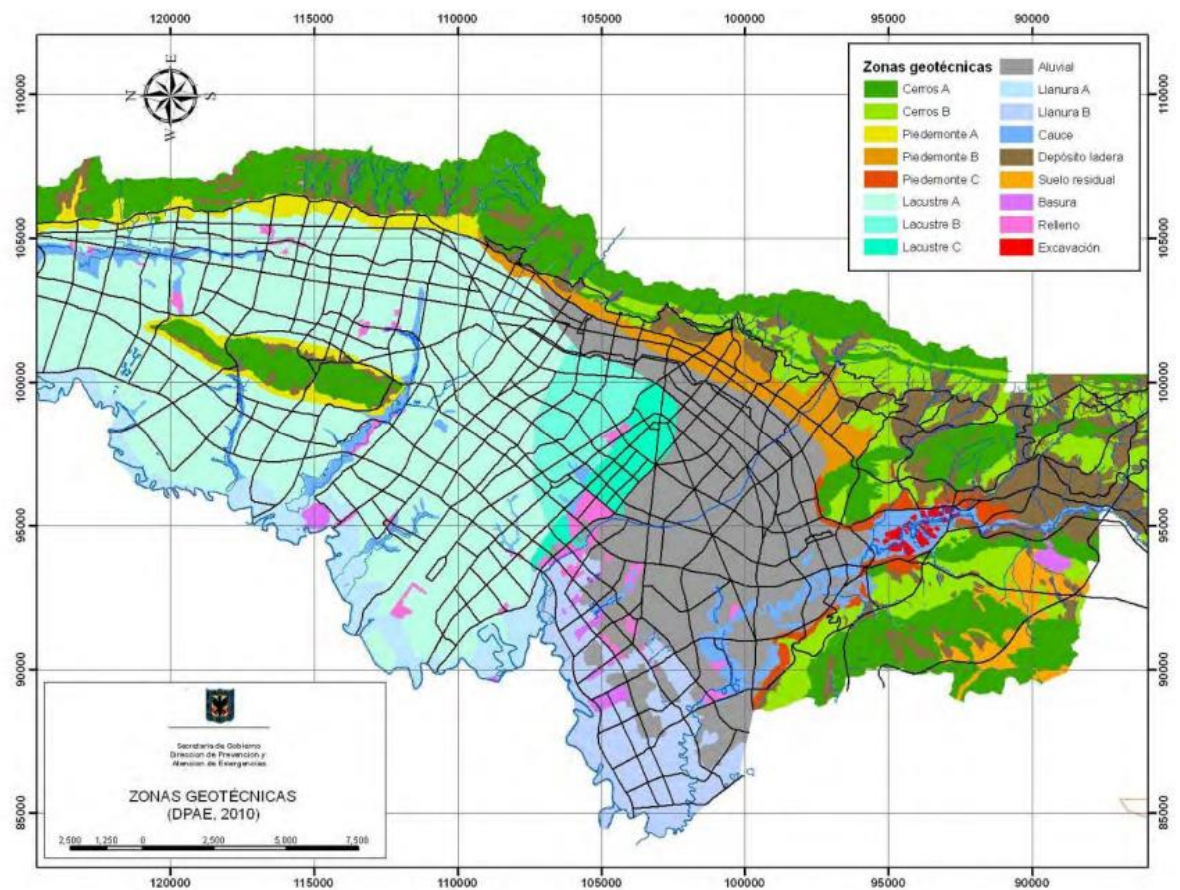


Figura 2: Zonas Geotécnicas, (DPAE, 2010)

Fuente: Fondo de Prevención. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismoresistente de edificaciones, 2010. Pág. 51.

Nombre	Geotecnia	Geología	Geomorfología	Composición principal	Comportamiento geotécnico general	Espesor
Cerros A	Roca de arenisca	Formaciones de Areniscas	Cerros de alta pendiente	Areniscas duras	Rocas competentes y resistentes a la meteorización, eventuales problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas o con intercalaciones de arcillolitas blandas	
Cerros B	Roca de arcillolita	Formaciones de Arcillolitas	Cerros de moderada a alta pendiente	Arcillolitas blandas	Rocas de moderada competencia y susceptibles a la meteorización, problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas	
Piedemonte A	Suelo coluvial y aluvial norte	Coluviones y Complejo de Conos Aluviales	Piedemonte	Gravas arcillo arenosas compactas	Suelos de alta capacidad portante pero pueden presentar problemas de inestabilidad en excavaciones abiertas	< 50 m
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro			Gravas areno arcillosas compactas		
Piedemonte C	Suelo coluvial y aluvial sur			Gravas areno arcillosas compactas		
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	Terraza Alta - Lacustre	Planicie	Arcillas limosas muy blandas	Suelos de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles	20 - 500 m
Lacustre B	Suelo lacustre blando			Arcillas limosas blandas		
Lacustre C	Suelo lacustre - aluvial			Arcillas arenosas firmes		
Aluvial	Suelo aluvial grueso a medio	Terraza Baja - Aluvial y Complejo de Conos Aluviales	Planicie	Arenas arcillosas sueltas a compactas	Suelos de mediana a alta capacidad portante poco compresibles, susceptibles a licuación e inestables en excavaciones a cielo abierto	50 - 250 m
Llanura A	Suelo de llanura - lacustre	Llanura de Inundación	Llanura	Arenas sueltas y arcillas limosas blandas	Suelos de moderada capacidad portante y compresibles, susceptibles a licuación	200 - 500 m
Llanura B	Suelo de llanura - aluvial			Arenas sueltas y arcillas arenosas duras		
Cauce	Cauce activo o antiguo	Cauces Activos	Piedemonte y Planicie	Gravas arenosas sueltas a compactas	Suelos de baja a mediana capacidad portante, susceptibles a licuación y problemas de estabilidad de taludes	
Depósitos	Suelo de ladera	Depósitos de Ladera	Cerros	Gravas areno arcillosas compactas	Suelos de mediana capacidad portante susceptibles a problemas de estabilidad de taludes	5 - 15 m
Residual	Suelo residual	Suelo Residual	Cerros	Arcillas gravo arenosas firmes	Suelos de mediana a alta capacidad portante con posibles problemas de estabilidad de taludes en sectores de alta pendiente	5 - 10 m
Basura	Relleno de basura	Rellenos de Basuras	Piedemonte y Planicie	Basuras	Materiales heterogéneos, que acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes	
Relleno	Relleno de excavación	Rellenos de Excavación	Piedemonte y Planicie	Rellenos heterogéneos	Materiales heterogéneos, que acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes	
Excavación	Excavación especial	Excavaciones Especiales	Piedemonte	Gravas arenosas sueltas a compactas	Zonas de explotación de agregados en el Río Tunjuelo, susceptibles a problemas de estabilidad de taludes	

Tabla 1: Descripción de las zonas geotécnicas, (DPAE, 2010)

Fuente: Fondo de Prevención. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismoresistente de edificaciones, 2010. Pág. 51.

Estas condiciones representan desafíos significativos para la construcción, debido a su baja capacidad de carga, alta compresibilidad y comportamiento variable con el tiempo, especialmente por la subsidencia y el descenso del nivel freático. Esto requiere un análisis minucioso por parte de los ingenieros para garantizar la estabilidad y durabilidad de las estructuras. (Sierra, 2024).

Antes de 1984, no era obligatorio hacer estudios de suelos para edificios de hasta cuatro pisos. Esto llevó a que se usaran cimentaciones superficiales, como zapatas aisladas y, en algunos casos, pilotes de madera. En áreas con suelo blando, los edificios más altos se cimentaban con placas flotantes o semiflotantes, pero esto causó asentamientos diferenciales significativos, especialmente en lugares como El Lago y Chicó. (Orozco, 2006).

Durante los años 60 y 70, empezaron a construirse edificios más altos en suelos blandos, lo que requería cimentaciones más sofisticadas. Se intentó usar pilotes de fricción, pero su capacidad resultó ser insuficiente, como se evidenció en ensayos fallidos en la zona de El Lago. También se exploró la opción de excavaciones profundas para cimentaciones flotantes, pero las fallas del terreno limitaron su viabilidad. (Orozco, 2006).

Un caso particular fue el del edificio Centro 93, proyectado con 18 pisos y sótanos de aproximadamente 12 metros de profundidad. Para evaluar la estabilidad del suelo, se intentó construir un caisson anillado que permitiera su observación. Sin embargo, al alcanzar los 8 metros de profundidad, el revestimiento colapsó repentinamente, lo que evidenció las dificultades del terreno para soportar excavaciones profundas. (Orozco, 2006). Ver figura 4.

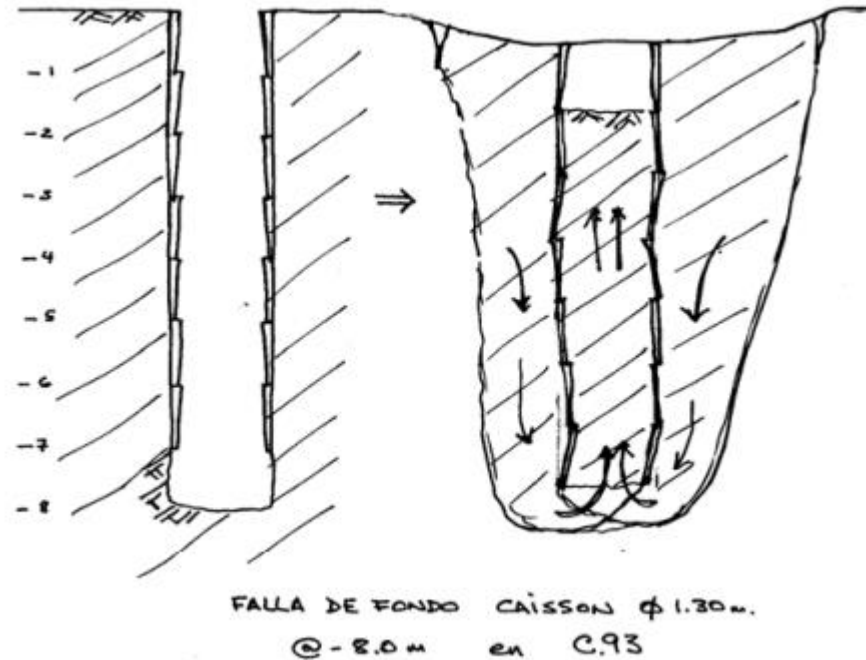


Figura 4: Diagrama explicativo de colapso caisson, Centro 93

Fuente: Orozco, L. F. (2006). Asentamientos de fundaciones en la arcilla de Bogotá. *Encuentro de Suelos y Estructuras*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, pág 8.

En los años 80, se introdujeron pilotes de fricción más profundos y resistentes, que se utilizaron con éxito en la construcción de puentes y edificios más altos. Sin embargo, su alto costo impidió que se adoptaran de manera masiva. A partir de los años 90, se popularizó el uso de pilotes en combinación con placas de subpresión y cimentaciones mixtas, lo que mejoró la estabilidad y ayudó a reducir los asentamientos diferenciales. (Orozco, 2006)

Las cimentaciones son elementos estructurales que transmiten las cargas de la superestructura al suelo o roca competente. La elección del tipo de cimentación depende de la estratigrafía del suelo, la magnitud de la obra y los riesgos del terreno, especialmente en suelos con cambios volumétricos por presencia de agua. (Sierra, 2024).

En suelos blandos, como los de Bogotá, se emplean cimentaciones tipo losa-pilotes para edificaciones altas, ya que este sistema distribuye mejor las cargas, añade rigidez y transfiere el peso mediante fricción en los pilotes. Para construcciones pequeñas, como viviendas, se usan zapatas aisladas o corridas conectadas con vigas de amarre, las cuales ayudan a controlar los asentamientos diferenciales y distribuyen mejor las cargas. (Sierra, 2024).

Los estudiantes Félix Gómez, Oscar Martínez y Yenny Cristancho, de la Universidad de la Salle, en 2007 presentaron su trabajo de grado titulado "Análisis de asentamientos secundarios en los suelos de la zona del Lago en la ciudad de Bogotá D.C", mediante el cual investigaron los asentamientos secundarios en la zona del Lago, ubicada en el barrio Lago Gaitán de la localidad de Chapinero en Bogotá. Para ello extrajeron 5 muestras inalteradas de suelo mediante un sondeo realizado el 25 de junio de 2006. Las muestras fueron tomadas a profundidades que varían entre 1.40 m y 20.40 m, pero solo 4 fueron útiles para los análisis debido a las condiciones del material de la muestra más profunda. (Gómez, Martínez & Cristancho, 2007).

Los ensayos realizados incluyeron: contenido de humedad, límites líquido y plástico, gravedad específica, contenido de materia orgánica, granulometría por hidrómetro y ensayo de consolidación unidimensional. Este último se enfocó en los procesos de consolidación primaria y secundaria, con una duración de hasta 32 días para el análisis secundario, aplicando la norma INVIAS I.N.V.E. 151. (Gómez, Martínez & Cristancho, 2007).

Los ensayos, excepto el de consolidación, sirvieron para caracterizar el suelo y construir un perfil estratigráfico, permitiendo conocer la composición del terreno y la ubicación del nivel freático. Para calcular los esfuerzos efectivos, se consideraron el peso unitario de las muestras, el esfuerzo total (producto entre profundidad y peso unitario), y la presión de poros, ya que el nivel freático estaba por encima de los estratos evaluados. (Gómez, Martínez & Cristancho, 2007).

"A través del estudio realizado concluyeron que:

- El suelo en la zona del Lago se encuentra preconsolidado, esto se puede corroborar en el lugar que se realizó el sondeo, ya que en esta zona se encuentran obras aledañas que hacen que el suelo sufra sobrecargas causadas por el peso de cada una de ellas.
- Según Iglesias (1997:358) y de acuerdo con el resultado obtenido del índice de compresibilidad (C_c) de 0.3 el suelo es altamente compresible, indicando de esta forma que los asentamientos primarios son de gran importancia en cuanto a magnitud en el momento que estos se presentan. " (Gómez, Martínez & Cristancho, 2007, pág 93).

Para ilustrar la problemática de asentamientos diferenciales en Bogotá, se consultaron algunos artículos publicados en la web. Entre ellos el artículo "Tres conjuntos se hunden en Bogotá" publicado por Juan Carlos López Pertuz en 2013, en el que se muestran tres edificios en el barrio El Polo, que sufren hundimiento por

asentamiento diferencial. En la actualidad algunos de ellos fueron demolidos para construir vivienda nueva, ver figuras 5 y 6. (López, 2013).



Figura 5: Edificio barrio El Polo, Avenida Calle 80 x Carrera 30. Fotografía tomada el 02/04/2025 en donde se observa el ángulo de inclinación con la vertical debido al asentamiento diferencial.

Fuente: Propia.



Figura 6: Fotografía tomada en la Carrera 29 con Avenida Calle 80. 02/04/2025. Se observa la inclinación tanto vertical como horizontal producto del cabeceo del edificio hacia la zona interna del conjunto.

Fuente: Propia.

Estos conjuntos de apartamentos cada año descienden más, en el año 2013 presentaban una inclinación de 8 grados y un hundimiento de 27 centímetros, esto según el edil de la Alcaldía local de Barrios Unidos Juan Carlos Becerra, quién dice también que se han hecho estudios en el lugar por parte de la FOPAE (Fondo de Prevención y Atención a Emergencias); la cual por su parte, afirma por medio de Gustavo Palomino (Ingeniero civil de la Subdirección de emergencias) que este fenómeno se da, porque la construcción está hecha sobre suelos blandos, lo que produce un asentamiento del edificio por lo cual afirma que: “Estos edificios tienen el mismo problema de la torre de piza en Italia, en donde la base del edificio y sus cimientos están bien contruidos, pero el asentamiento de la tierra hace que la edificación presente una inclinación, sin afectar la carga de las vigas”. (López, 2013).

La estudiante Kimberly Argeñal, de la universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, presento en el año 2024 el trabajo de grado para la

maestría en Ingeniería Civil titulado “Asentamientos Diferenciales en Edificios de Zona Lacustre de Bogotá: Causas y Casos de Estudio”. Donde expuso el siguiente caso en términos académicos guardando en incógnito del nombre de los edificios. El estudio que se presenta aquí se centra en los asentamientos diferenciales de un edificio de Bogotá, el Edificio A, que se mantuvo estable durante más de 20 años, gracias a un diseño simétrico que alineaba su centro de gravedad con el centro geométrico, lo que evitó deformaciones. Sin embargo, la construcción de un nuevo edificio adyacente, el Edificio B, provocó cambios en el suelo que afectaron la estabilidad del Edificio A. Las principales fallas en la construcción del Edificio B incluyeron la falta de estabilización de los muros de excavación y falta de control con el nivel freático de la zona. Ver figura 7. (Sierra, 2024).

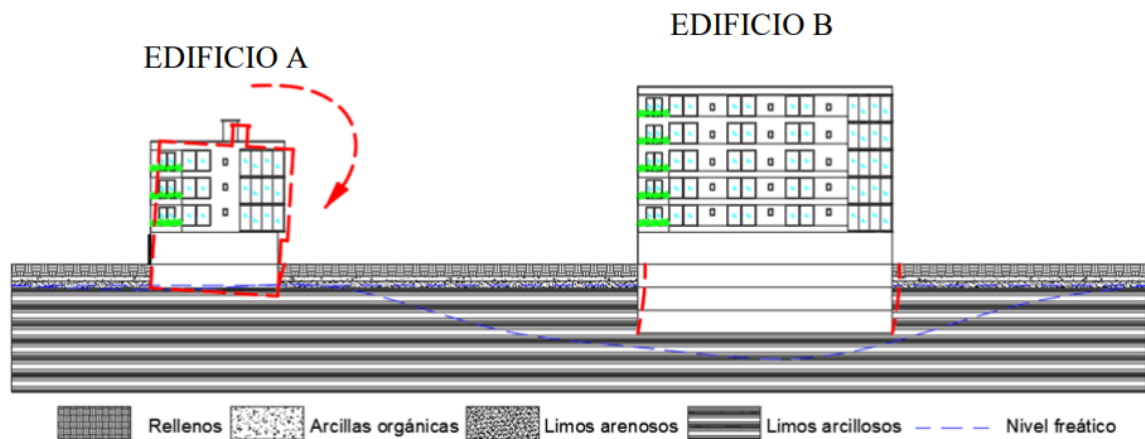


Figura 7: Estratigrafía y Comportamiento de edificios A y B. Caso de Estudio Maestría.

Fuente: Sierra, K. I. A. (2024). Asentamientos diferenciales en edificios de zona lacustre de Bogotá: causas y casos de estudio. Pag 116.

El Edificio B, que se cimentó con una placa y pilotes de fricción a 50 metros, requirió una excavación profunda con muros pantalla. Sin embargo, no se encontraron registros de estudios geotécnicos previos ni análisis de deformaciones en las propiedades vecinas, algo que la NSR-10 exige, ya que establece que se deben evaluar los efectos de nuevas construcciones dentro de un radio de cinco veces la altura del edificio en suelos lacustres. Un nuevo estudio geotécnico reveló que el suelo estaba compuesto por arcillas y limos hasta los 25 metros, con el nivel freático a solo 1.5 metros de la superficie. (Sierra, 2024).

El monitoreo inicial del Edificio A mostró un aparente ascenso, aunque en realidad el edificio estaba descendiendo más lento que su entorno. Esto se corrigió al instalar puntos de referencia a 60 metros de profundidad. Se determinó un asentamiento diferencial de 12 cm en un espacio de 8 metros, superando el límite normativo de distorsión angular de $1/300$, con una relación de $1/66$. Aunque el edificio no estaba en riesgo de colapso, se observó una pérdida de funcionalidad y un hundimiento acelerado. (Sierra, 2024).

El movimiento del suelo fue causado por la excavación del Edificio B, el descenso del nivel freático y el desplazamiento lateral de las pantallas, lo que generó esfuerzos adicionales en el suelo y asentamientos en ambas estructuras. (Sierra, 2024).

Entre las soluciones propuestas para el Edificio A se consideró pilotear el costado norte y esperar que el sur descendiera naturalmente para luego intervenirlo. Sin embargo, los propietarios rechazaron esta opción por el tiempo requerido. Se propuso entonces una segunda alternativa: acelerar el asentamiento del costado sur mediante cargas y drenaje, usar pilotes a tensión, permitiendo un proceso de corrección más controlado y efectivo. Ver figura 8. (Sierra, 2024).

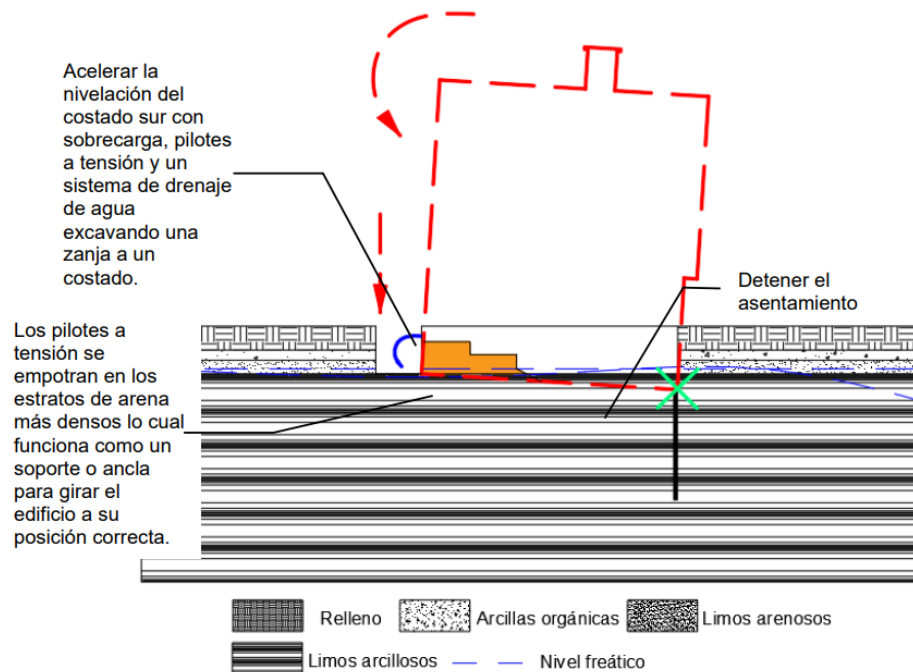


Figura 8: Solución propuesta para detener el movimiento en el costado norte con pilotes y acelerar el asentamiento del costado sur.

Fuente: Sierra, K. I. A. (2024). Asentamientos diferenciales en edificios de zona lacustre de Bogotá: causas y casos de estudio. Pag 118.

La Ciudad de México, a menudo llamada la "Cuenca del Valle de México", tiene una historia fascinante. Su fundación se realizó en una región rodeada de majestuosas sierras y volcanes, justo sobre el Lago de Texcoco, que estaba conectado con otros cuatro lagos: Zumpango, Xaltocán, Xochimilco y Chalco. Este sistema de lagos se formó hace más de 10,000 años, al final de la última era de hielo.

Con el tiempo, los lagos del Valle de México fueron desapareciendo, lo que dejó un subsuelo con características lacustres que han influido en su clasificación y estabilidad. Estas condiciones han causado varios problemas a lo largo de los años. Pero no solo el suelo ha jugado un papel importante; la intervención humana también ha sido crucial. La extracción de agua de los acuíferos, tanto para abastecer a la población como para buscar un mejoramiento del suelo, ha tenido un impacto significativo en la región.

Desde hace más de 2,000 años, las comunidades que habitan esta área han tenido que lidiar con fenómenos naturales como erupciones volcánicas, inundaciones y terremotos. Un evento notable ocurrió en 1629, cuando se produjo la inundación conocida como "El diluvio de San Mateo", ver figura 9. Lluvias durante 36 horas donde el agua alcanzó dos metros de altura cubriendo gran parte de la ciudad. No fue sino hasta cinco años después que la inundación finalmente desapareció. Los habitantes de la época atribuyeron este suceso a la intervención divina de la Virgen de Guadalupe, en lugar de considerarlo una consecuencia natural de la sequía. (González, 2021).



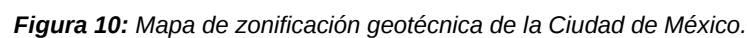
Figura 9: Foto ilustrativa del "Diluvio de San Mateo"

Fuente: <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/07/28/el-diluvio-de-san-mateo-cuando-la-cdmx-se-inundo-por-5-anos/>

A principios del siglo XX, el rápido crecimiento de la población llevó a un aumento en la perforación de pozos para extraer agua, con el fin de satisfacer la creciente demanda. Como resultado, los acuíferos empezaron a agotarse, lo que dio lugar a un fenómeno conocido como subsidencia, que se refiere al hundimiento gradual o

En 1959, Raúl J. Marsal y Marcos Mazari publicaron la primera edición del libro "El subsuelo en la Ciudad de México, Vol. 1", donde presentaron la primera zonificación geotécnica del área urbana. Como se ilustra en la figura 10, esta zonificación se dividió en tres áreas:

- (Universidad Nacional Autónoma de México & Instituto de Ingeniería UNAM, 2020).



27

Los depósitos lacustres llegan a los lagos a través de los ríos, especialmente en sus desembocaduras, donde crean abanicos aluviales que pueden extenderse hacia el interior del lago. Con el tiempo, las partículas más finas, como arcillas y limos, se mueven hasta el centro del lago, donde finalmente se asientan. Los lagos, al ser cuerpos de agua que se almacenan en cuencas o depresiones, tienden a desaparecer debido a la erosión y a la acumulación gradual de sedimentos. (Díaz, 2006).

Con el paso del tiempo, la inestabilidad del suelo comenzó a reflejarse en el asentamiento diferencial de diversas edificaciones. Un ejemplo claro es el hundimiento de la Catedral Metropolitana. El 11 de abril de 1989, tras una lluvia en el Valle de México, aparecieron goteras en distintas áreas de la catedral, algo que, al parecer, ya había ocurrido antes. Sin embargo, dado que el edificio tenía más de 400 años de antigüedad, no se le prestó mucha atención. (Aguilera, 2013).

Poco después, se descubrieron grietas de gran tamaño que no habían sido visibles previamente (ver figura 11). La estabilidad y seguridad del edificio estaban en riesgo. La primera hipótesis sugería que las grietas podrían haber sido causadas por un sismo, pero en ese período no se había registrado ninguno. La segunda hipótesis, que cobró mayor fuerza, apuntaba al asentamiento diferencial de la edificación, un problema relacionado con la inestabilidad del suelo en la ciudad desde el siglo XVI.

El hundimiento diferencial es especialmente problemático porque afecta distintas partes de una estructura de manera desigual. Esto significa que un lado del edificio puede desplazarse, inclinarse o girar de forma diferente al resto, generando daños en su estructura y poniendo en peligro su estabilidad. (Aguilera, 2013).

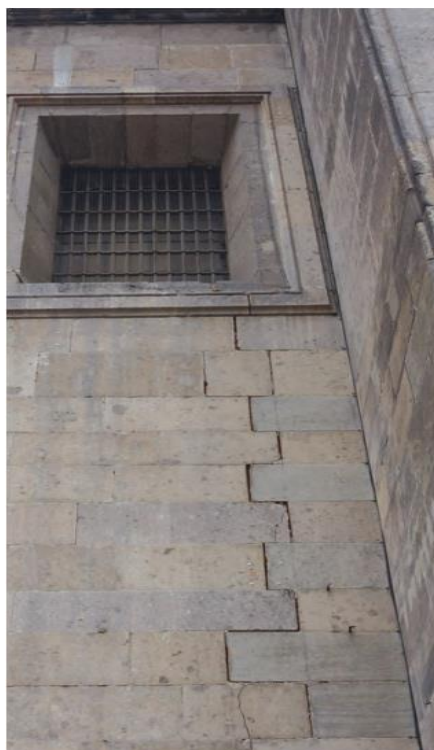


Figura 11: Los daños físicos más visibles de la Catedral debido a los hundimientos diferenciales han sido las grietas en muros y el levantamiento del piso de mármol en las naves procesionales.

Fuente: Aguilera, P. (2013). *Catedral Metropolitana. Hundimiento y rescate. Chapter II. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería, México. Pag. 19.*

La Ciudad de México, en sus primeros días, se abastecía principalmente de manantiales. Sin embargo, a medida que la población creció, la demanda de agua se disparó. En 1886, se iniciaron las actividades de extracción de agua del subsuelo mediante más de mil pozos, lo que probablemente marcó el comienzo del hundimiento de la ciudad. Las mediciones realizadas entre 1891 y 1895 mostraban un hundimiento de alrededor de 5 cm por año. Más tarde, entre 1938 y 1948, esa cifra se disparó hasta alcanzar los 18 cm anuales. (Lesser & Cortés, 2015).

Además de la Catedral Metropolitana, otro claro ejemplo de este fenómeno es el hundimiento del monumento al Ángel de la Independencia. Este monumento tiene una cimentación profunda sostenida por pilotes en sus extremos, lo que le ha permitido mantenerse estable a lo largo del tiempo. Sin embargo, el suelo a su alrededor ha seguido hundiéndose, causando un desnivel notable en la calle que lo rodea. Dado que la estructura se apoya sobre estratos duros a unos 30 metros de profundidad, no ha sufrido el mismo hundimiento que su entorno. Para compensar esta diferencia y mitigar los efectos del hundimiento, se han añadido escalones a la rotonda que rodea el monumento, los cuales todavía se pueden ver hoy en día (ver figura 12). (Aguilera, 2013).



Figura 12: Monumento Ángel de la Independencia, Ciudad de México (1910 – 2013).

Fuente: Aguilera, P. (2013). *Catedral Metropolitana. Hundimiento y rescate. Chapter II. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería, México. Pag. 26*

Para comenzar con los trabajos de intervención en la Catedral Metropolitana, lo primero que se llevó a cabo fueron sondeos detallados para examinar los antecedentes geológicos, geotécnicos, estratigráficos e históricos del lugar. Estos estudios revelaron una diferencia de nivel de 55 cm entre las esquinas izquierda y derecha del edificio, como se ilustra en la figura 13. La ubicación de la ciudad en una cuenca lacustre —que originalmente estaba formada por cinco lagos— tuvo un impacto en la estabilidad del terreno. Aunque cuando llegaron los españoles aún había agua presente, el proceso de desecación ya había comenzado y se intensificó de manera artificial durante la época colonial y el siglo XIX. (Aguilera, 2013).

El proyecto de rehabilitación de la catedral, en su fase inicial, se centró en tres objetivos estratégicos:

1. Corregir el hundimiento acumulado que se había registrado hasta ese momento.
 2. Mejorar las características del suelo para disminuir la velocidad del hundimiento y evitar que las vibraciones generadas durante los trabajos de restauración afectaran la estructura del edificio.
 3. Reforzar la infraestructura para mejorar la seguridad y estabilidad de la catedral.
- (Aguilera, 2013).

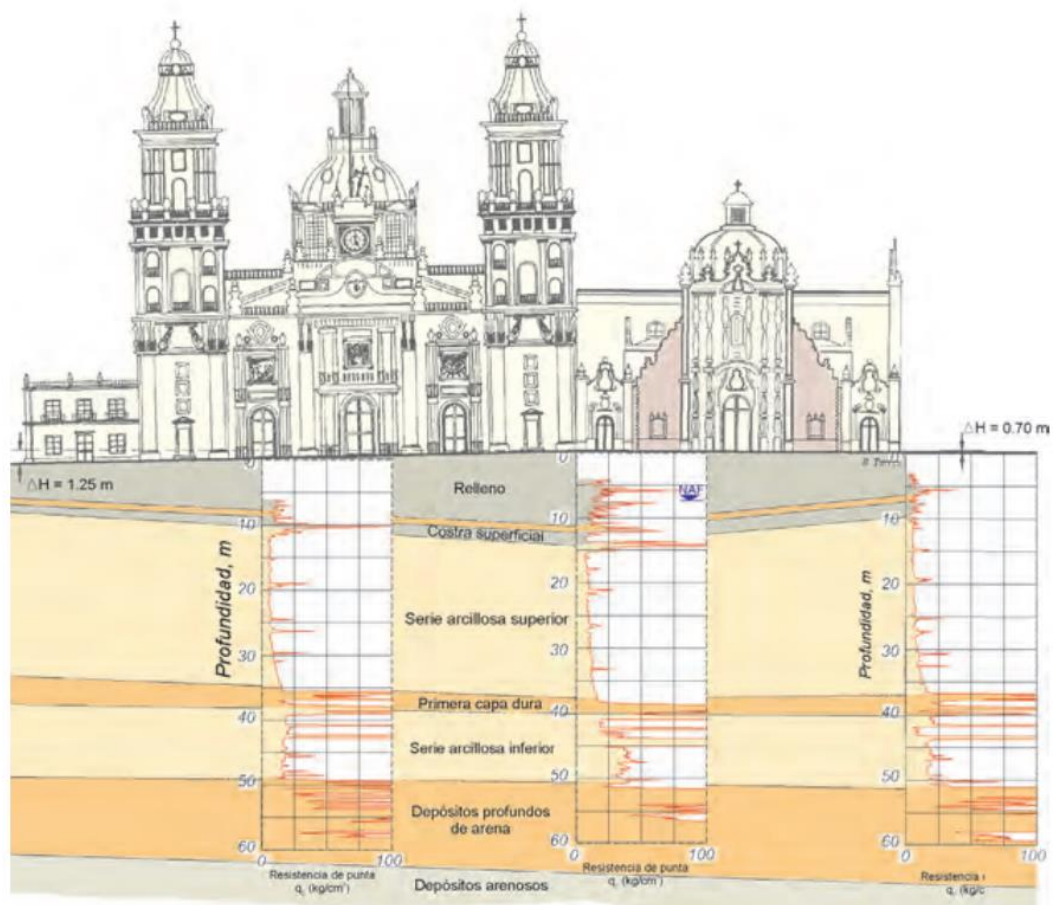


Figura 13: Estratigrafía del subsuelo y desniveles de la superficie.

Fuente: Aguilera, P. (2013). *Catedral Metropolitana. Hundimiento y rescate. Chapter II. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería, México. Pag. 21.*

Las primeras alternativas que se propusieron para intervenir en la Catedral Metropolitana, con el fin de mitigar los daños del pasado y prevenir futuras deformaciones, incluyeron varias opciones: colocar pilotes hasta llegar a la capa de suelo firme, instalar pilas apoyadas en depósitos profundos, subexcavar las arcillas blandas, restituir la presión del agua extraída o utilizar micropilotes. Después de un análisis exhaustivo, se decidió optar por la subexcavación de la arcilla blanda.

Estas opciones fueron evaluadas de manera rigurosa por ingenieros y arquitectos, quienes tomaron en cuenta factores clave como los objetivos estructurales, la seguridad de cada método, la mínima interferencia con las actividades de la iglesia, así como el tiempo y el costo de ejecución. (Aguilera, 2013).

Finalmente, en agosto de 1993, se dio inicio a la intervención mediante subexcavación. Este proceso consistió en descender a las zonas más bajas de la edificación a través de lumbreras y extraer lentamente el subsuelo. El objetivo era

retirar de manera controlada la arcilla de la cimentación en áreas con menor deformación para equilibrar la velocidad de hundimiento en diferentes partes de la estructura (ver figura 14). (Aguilera, 2013).

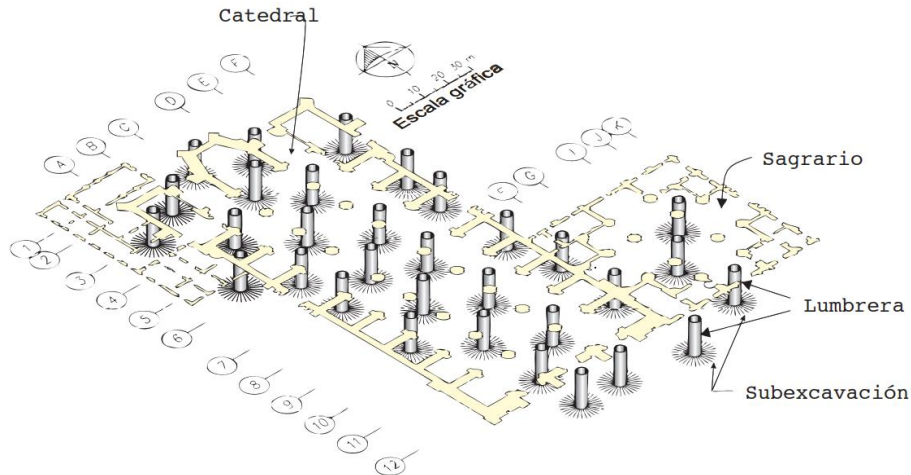


Figura 14: Zonas donde se realizaron lumbreras para excavación de arcillas.

Fuente: Aguilera, P. (2013). *Catedral Metropolitana. Hundimiento y rescate. Chapter II. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería, México. Pag. 37.*

La intervención se llevó a cabo en varios pasos clave. Primero, se construyeron lumbreras de acceso; luego, se redujo el nivel freático de manera puntual para facilitar el trabajo dentro de estas lumbreras. Después, se realizó una subexcavación controlada, extrayendo pequeñas porciones de suelo hasta alcanzar el volumen establecido (ver figura 15).

Para llevar a cabo la subexcavación, fue necesario utilizar equipo mecánico especializado, que incluía un compresor hidroneumático y un émbolo. Este émbolo, que medía 1.20 metros de longitud y 10 centímetros de diámetro, se introducía en el suelo hasta una profundidad de entre 6 y 7 metros. A medida que el émbolo perforaba, el tubo se llenaba de arcilla, que luego era extraída, dejando pequeños túneles en el subsuelo. Con el tiempo, estos túneles colapsaban de forma natural, permitiendo una redistribución controlada del suelo. (Aguilera, 2013).

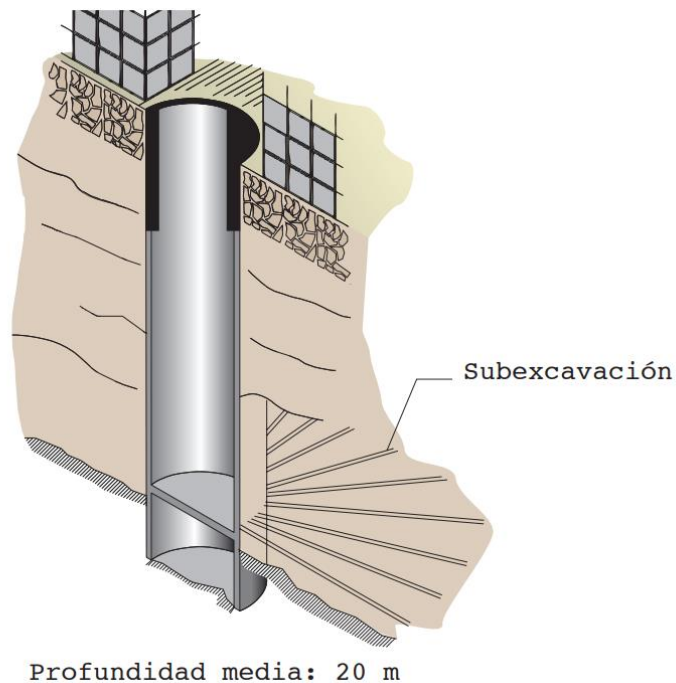


Figura 15: Proceso de subexcavación.

Fuente: Aguilera, P. (2013). *Catedral Metropolitana. Hundimiento y rescate. Chapter II. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería, México. Pag. 37.*

Después de terminar el proceso de subexcavación, se realizó un tratamiento del suelo inyectando mortero en diferentes zonas de la catedral. Como era de esperar, el hundimiento diferencial no solo impactó el terreno, sino que también afectó algunas partes de la estructura del edificio.

Por esta razón, se comenzaron trabajos de inspección y refuerzo en varias columnas, con el fin de asegurar la estabilidad y la seguridad de la edificación.

5. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo busca generar una alerta temprana sobre la problemática actual en proyectos de ingeniería civil asociados a fenómenos como asentamientos diferenciales, subsidencia y consolidación de suelos. Estos riesgos, vinculados a las condiciones geológicas de Bogotá y su historia lacustre, representan un desafío crítico para la sostenibilidad urbana.

Un ejemplo claro es el caso del barrio El Polo, donde la falta de rigurosidad en los procesos constructivos ha derivado en graves afectaciones para la comunidad. Los residentes se ven obligados a desalojar sus viviendas debido al riesgo estructural, sin alternativas claras de reubicación. Esto evidencia la ausencia de una

planificación que considere los asentamientos progresivos a mediano y largo plazo en suelos altamente compresibles.

Este problema tiene sus raíces en la falta de normativas estrictas en el pasado, que permitieron construcciones sin estudios geotécnicos adecuados. Aunque hoy existe un boom urbanístico en Bogotá—visible en la proliferación de proyectos de vivienda masiva—, los fenómenos de subsidencia y consolidación siguen generando pérdidas económicas significativas. Estas se derivan tanto de los costos para estabilizar estructuras afectadas como de las implicaciones en seguridad estructural.

Adicionalmente, la falta de acceso a información actualizada ha sido un obstáculo para esta investigación. Si bien los estudios de suelos son fundamentales en la etapa de prefactibilidad, muchas empresas constructoras no los divulgan, limitando el análisis de casos específicos y la transparencia en la gestión del riesgo geotécnico.

6. MARCO REFERENCIAL

A continuación, se referencia el marco teórico y el marco técnico:

6.1 MARCO TEÓRICO:

- *Teoría de la Consolidación:*

Los suelos, a diferencia de muchos otros materiales de construcción, tienen una relación bastante compleja entre el esfuerzo y la deformación, especialmente por la presencia de agua en sus poros. Cuando se les aplica una carga, la deformación no sucede de inmediato; primero, el agua tiene que ser expulsada, y esto puede llevar un buen tiempo, sobre todo si el suelo es poco permeable, como es el caso de las arcillas. (Crespo, 2004).

Es bastante común que los ingenieros se enfoquen en las arcillas blandas que están a la vista, pero a menudo pasan por alto las capas más profundas, lo que puede resultar en asentamientos diferenciales inesperados. Por esta razón, el estudio de la compresibilidad de estas arcillas se ha vuelto crucial, y se han desarrollado métodos para estimar los asentamientos y ajustar los diseños de cimentaciones en consecuencia. (Crespo, 2004).

Para analizar este comportamiento, se utiliza en el laboratorio la prueba de consolidación unidimensional, que fue ideada por Terzaghi. En esta prueba, se aplica una carga vertical a una muestra que está confinada lateralmente, utilizando un consolidómetro de anillo libre diseñado por Casagrande. Este equipo permite medir las deformaciones con un micrómetro y registrar el

tiempo con un cronómetro, mientras se aplican cargas de manera progresiva. (Crespo, 2004).

Los resultados se muestran en curvas de consolidación, que ilustran cómo avanza la deformación a lo largo del tiempo. Según Terzaghi, la primera parte de la curva (AB) se refiere a la *consolidación primaria*, que es causada por la expulsión del agua. La segunda parte (BC) representa la *consolidación secundaria*, que se debe al reacondicionamiento plástico de las partículas del suelo. Ver figura 16. (Crespo, 2004).

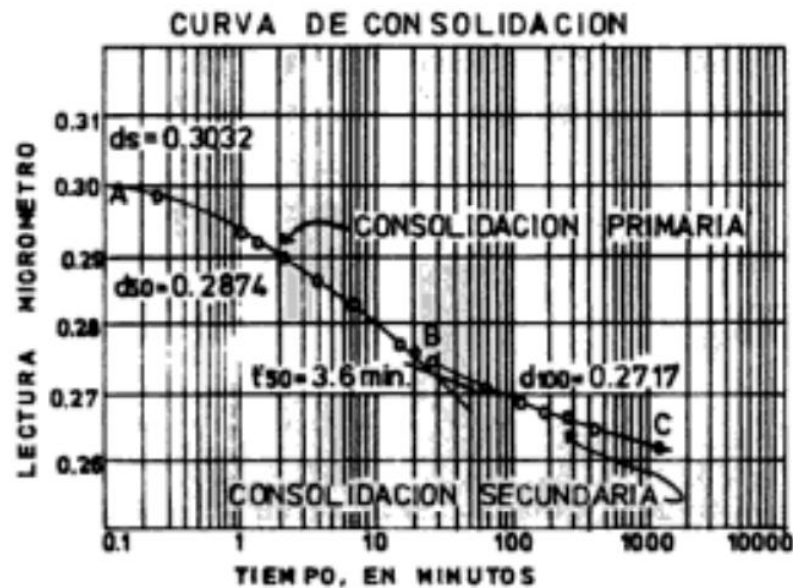


Figura 16: Curva de consolidación.

Fuente: Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Pág. 208.

- **Asentamientos:**

Las cimentaciones inducen esfuerzos en el suelo que generan deformaciones verticales, especialmente en suelos finos debido a su compresibilidad. A diferencia de materiales como el acero o el concreto, cuyo comportamiento se puede predecir con el módulo de Young, el suelo presenta una respuesta más variable por su heterogeneidad. (Sierra, 2024)

Los daños en edificaciones por movimiento del suelo suelen deberse a una compresión y mal comportamiento del terreno, muchas veces por estudios inadecuados. Predecir asentamientos requiere experiencia, conocimiento del entorno local y análisis adecuados del suelo. (Sierra, 2024).

Luego de determinar la capacidad portante del suelo, es esencial evaluar los asentamientos esperados y compararlos con los que la edificación puede tolerar. La vulnerabilidad ante asentamientos varía según el tipo de estructura: las de mampostería son más frágiles que las de concreto reforzado, y estas a su vez, más que las estructuras metálicas. (Sierra, 2024).

Los asentamientos diferenciales pueden causar daños visibles en las estructuras, como fisuras, grietas, deterioro de acabados, inclinaciones notorias y fallos en instalaciones. En casos extremos, incluso pueden provocar el colapso del edificio, pese a haberse considerado altos factores de seguridad. (Sierra, 2024).

- *Subsidencia:*

La subsidencia del suelo puede generar asentamientos totales o diferenciales, afectando las edificaciones según sus características estructurales y la intensidad del fenómeno. Este proceso representa un riesgo importante para las ciudades, provocando daños estructurales, fisuras, e incrementando el riesgo de inundaciones. La subsidencia no depende de las cargas aplicadas, sino de factores externos como la extracción de agua subterránea, fugas, raíces de árboles o minería. Se requieren estudios especializados y políticas públicas para su monitoreo y control, ya que la información sobre su magnitud y velocidad aún es limitada. (Sierra, 2024).

La subsidencia en Bogotá ha sido causada principalmente por factores ambientales, urbanísticos y sociales. Entre los más relevantes se encuentran la mala gestión del agua, la modificación del uso del suelo y la falta de planificación urbana que considere el comportamiento del agua subterránea. Estudios indican que el descenso del nivel freático está directamente relacionado con el hundimiento del terreno, especialmente en el norte de la ciudad. (Sierra, 2024).

La extracción descontrolada de agua subterránea, la desecación de humedales y el calentamiento global han provocado la pérdida de humedad en suelos arcillosos, volviéndolos inestables para la construcción. A pesar de existir normas para proteger los recursos hídricos, el enfoque ha sido más económico que ambiental, lo cual ha generado riesgos a largo plazo. (Sierra, 2024).

Los humedales, fundamentales para la biodiversidad y el equilibrio climático, han sido drásticamente reducidos: se ha perdido más del 90% en Bogotá. Esta situación, agravada por el cambio climático, acelera la desecación del suelo, proyectando que el 19% de la población mundial podría verse afectada por subsidencia en el futuro. (Sierra, 2024).

Aunque existen leyes para proteger estos ecosistemas y el uso del agua, faltan estrategias claras, monitoreo periódico y actualización de herramientas técnicas como mapas y redes de pozos. Para futuros proyectos en Bogotá se requiere una intervención multidisciplinaria, que contemple infraestructura hidráulica, vegetación y condiciones del subsuelo, desde la etapa de diseño, para mitigar riesgos asociados a asentamientos diferenciales. (Sierra, 2024).

- *Nivel freático:*

El suelo está compuesto por partículas con poros interconectados, permitiendo el paso del agua superficial hacia capas más profundas hasta alcanzar un estrato impermeable, formando así la capa freática. El límite superior de esta capa se conoce como nivel freático. Según su ubicación y movilidad, el agua en el suelo se clasifica como:

- Agua gravitacional: es la que se mueve libremente por los poros del suelo debido a la gravedad.
- Agua freática: se encuentra por debajo del nivel freático, saturando completamente los poros del suelo.
- Agua retenida: permanece adherida a las partículas del suelo por fuerzas de tensión superficial y adsorción, sin posibilidad de drenaje.

El movimiento del agua freática obedece la ley de Darcy, la cual establece que la velocidad de filtración es proporcional al gradiente hidráulico. En la figura 17, se puede observar la clasificación que realiza Crespo Villalaz. (Crespo, 2004).

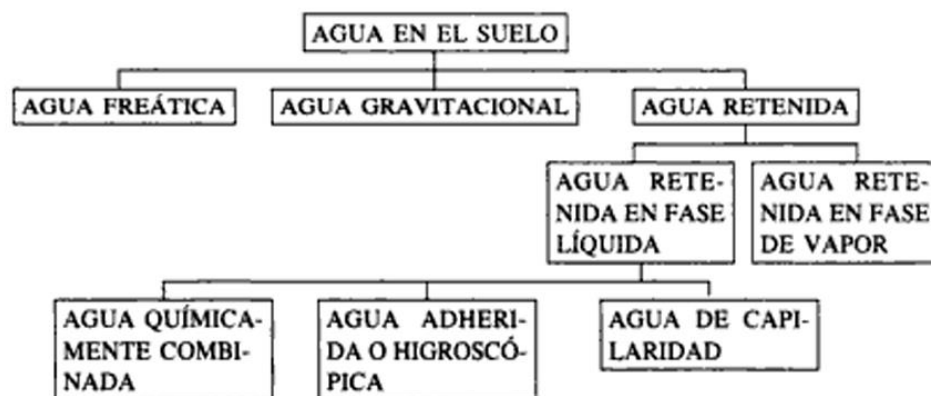


Figura 17: Clasificación de Agua en el suelo de Crespo Villalaz.

Fuente: Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Pág. 143.

La ubicación del nivel freático influye directamente en la profundidad de desplante de las cimentaciones. En suelos como arenas o limos, excavar por debajo de dicho nivel presenta dificultades debido a la falta de cohesión, lo que impide la estabilidad de los taludes. Por ello, se requiere la implementación de sistemas especiales de drenaje para abatir el nivel freático. Además, la presencia de agua subterránea reduce la capacidad de soporte del suelo debido al efecto de sumersión, donde las partículas del suelo tienden a separarse, disminuyendo la fricción entre ellas. En los casos en que las cimentaciones se ubiquen por encima del nivel freático, es fundamental garantizar su impermeabilización. (Sierra, 2024).

6.2 MARCO TÉCNICO

- *Normativa vigente:*

NSR- 10: La norma NSR-10 establece que es responsabilidad del ejecutor del proyecto asegurar que se realicen los cálculos necesarios para evaluar deformaciones en el suelo que puedan afectar estructuras vecinas, y aplicar medidas para evitar desplazamientos excesivos. Para ello, el estudio de suelos debe detallar las propiedades físico-mecánicas del terreno, garantizando la estabilidad de excavaciones, sistemas de contención y estructuras, con el acompañamiento de un geotecnista durante la construcción. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], 2010).

La NSR-10 fija criterios para estudios de suelos y diseño de cimentaciones, incluyendo profundidades mínimas de sondeo, que deben considerar tanto la longitud del pilote más largo como un extra según su diámetro o el ancho del grupo. En excavaciones, se exige una profundidad mínima de 1.5 a 2 veces la profundidad del sótano, según el tipo de suelo. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], 2010).

Además, la norma exige actas de vecindad para documentar el estado previo de construcciones colindantes, lo cual permite identificar daños causados por la obra. También se destaca la importancia de realizar sondeos de perforación adecuados en cantidad y profundidad, dependiendo de la categoría de la edificación, definida por el número de niveles y cargas que soportarán las columnas. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], 2010).

7. METODOLOGÍA

Bajo un enfoque de investigación cualitativa de tipo descriptivo-analítico, este trabajo propone iniciar con una caracterización de los suelos mediante una tecnología aplicable, con el fin de identificar sus propiedades y problemas asociados. Para ello, se ha diseñado un estudio comparativo tomando como referencia los casos de Bogotá y Ciudad de México.

Fases de la investigación:

Fase 1: Revisión bibliográfica y recopilación de datos

- Recolección de antecedentes: Revisión de literatura científica (artículos, trabajos de grado, informes técnicos) sobre suelos lacustres, asentamientos, consolidación y subsidencia.
- Análisis de mapas geotécnicos y estudios previos (ej. FOPAE, INGEOMINAS, UNAM).
- Identificación de parámetros clave: Factores desencadenantes (extracción de agua, cargas estructurales, variaciones del nivel freático).

Fase 2: Análisis de casos de estudio

- Selección de casos de referencia: Bogotá, Edificios en barrio El Lago, Chicó, El Polo, y casos documentados por Orozco (2006) y Sierra (2024). Ciudad de México, Catedral Metropolitana, Monumento al Ángel de la Independencia.
- Variables analizadas: Tipo de cimentación empleada, magnitud de asentamientos diferenciales registrados, soluciones implementadas y su eficacia.

Fase 3: Propuesta de soluciones

- Clasificación de medidas de mitigación: Técnicas convencionales, Pilotes de fricción, losas flotantes, inyecciones de mortero.

Innovadoras: Subexcavación controlada (como en la Catedral de CDMX), sistemas de drenaje para estabilizar el nivel freático.

Unificar información público-privada para actualizar los mapas geotécnicos de subsidencia, consolidación y asentamientos en diferentes zonas de la ciudad.

8. CONCLUSIONES

- ✓ La incertidumbre en el comportamiento del suelo en los proyectos de ingeniería civil seguirá siendo una constante. Esto se debe a que su respuesta puede variar por múltiples factores, como cambios en el nivel freático, las condiciones geológicas, el uso del suelo y fenómenos climáticos observables. Además, intervenciones humanas como la extracción de agua subterránea y la construcción de nuevas edificaciones también influyen significativamente en su estabilidad.
- ✓ La subsidencia es un fenómeno que continuará manifestándose tanto con el avance de los proyectos de infraestructura como con el crecimiento poblacional, y se proyecta como un desafío persistente a futuro. Es responsabilidad de las entidades gubernamentales promover e implementar medidas efectivas que ofrezcan soluciones sostenibles, no solo a nivel local en la ciudad de Bogotá, sino también a escala nacional e internacional, ya que este fenómeno también se presenta en diversas regiones del mundo.
- ✓ La limitada accesibilidad a la información proveniente de estudios de suelos realizados por empresas públicas y privadas es un aspecto que requiere mejora. Dado que, según la normativa vigente, los estudios geotécnicos son un requisito indispensable para el desarrollo de proyectos, resulta fundamental consolidar una fuente de información compartida entre los sectores públicos y privados, alimentada de manera colaborativa por todos los actores involucrados.

9. RECOMENDACIONES

- ✓ Garantizar un proyecto seguro conforme a la NSR-10 implica considerar múltiples factores, muchos de ellos naturales e impredecibles, como la subsidencia y los asentamientos diferenciales, que pueden surgir por mínimas variaciones en los esfuerzos del suelo o la estructura. Estos fenómenos resaltan la dificultad de reemplazar un material natural como el suelo por sistemas artificiales como el concreto, cuya rigidez y adaptabilidad son limitadas frente a los movimientos del terreno y la presencia de agua.
- ✓ Una de las estrategias para reducir riesgos por asentamientos diferenciales es modificar el diseño estructural, por ejemplo, eliminando los sótanos destinados a parqueaderos, ya que las excavaciones profundas necesarias para estos generan gran parte de las deformaciones del suelo circundante.

No obstante, las propias leyes urbanas fomentan la inclusión de parqueaderos en edificaciones comerciales y residenciales, incentivando su uso mediante tarifas más bajas cuanto mayor sea el tiempo de ocupación.

- ✓ Las curadurías urbanas, en su calidad de entidades reguladoras del desarrollo constructivo, deberían implementar un sistema obligatorio de gestión y divulgación de información técnica. Este sistema incluiría:

- La recopilación sistemática de estudios de prefactibilidad geotécnica.
- El monitoreo continuo de riesgos asociados a deformaciones del suelo.
- La publicación periódica de datos relevantes sobre: Asentamientos diferenciales, procesos de subsidencia y estado de consolidación de suelos.

Esta medida permitiría generar alertas tempranas y optimizar la toma de decisiones en proyectos de construcción dentro del perímetro urbano.

- ✓ Bogotá presenta múltiples zonas con riesgo potencial de asentamientos diferenciales en edificaciones. Por ello, resulta fundamental que las empresas constructoras:

- Reporten obligatoriamente todos los estudios geotécnicos realizados.
- Notifiquen oportunamente cualquier fenómeno anómalo detectado durante la ejecución de obras.
- Publiquen los datos técnicos relevantes para la actualización del mapa de riesgos de subsidencia.

Actualmente, existe una práctica preocupante ya que algunos constructores ocultan esta información para evitar afectar la comercialización de sus proyectos. Sin embargo, la transparencia en estos casos es esencial para garantizar la seguridad estructural, permitir la toma de decisiones informadas por parte de compradores y mejorar la planificación urbana basada en datos reales.

Esta medida contribuiría significativamente a la gestión preventiva de riesgos geotécnicos en la ciudad.

- ✓ De acuerdo a un conversatorio realizado en la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, “Asentamientos en la Sabana de Bogotá y las implicaciones en las edificaciones”, realizado el 15 de mayo de 2024. Se toman las siguientes recomendaciones:

- Se deben proteger los humedales, hoy ocupan menos del 2% de lo que ocupaban a mediados del siglo pasado.

- En estudios de suelos se deben estudiar los cambios hidrogeológicos.
- Necesidad de incluir en estudios geotécnicos: componentes ambientales como los humedales y las aguas subterráneas.
- Ampliar los criterios sobre el diseño de reforzamiento, licenciamiento y estabilización de cimentaciones.
- Elaboración de unas guías y directrices para ingenieros estructurales, geotecnistas y revisores sobre el diseño de cimentaciones y la evaluación de asentamientos inmediatos, de consolidación, diferenciales (por ejemplo, en pilotes hincados, fundidos en sitio).
- Se requiere un análisis del impacto del metro con la ciudad y edificaciones vecinas considerando procesos constructivos, subsidencia, manejo de agua, asentamientos propios, diferenciales e inducidos: línea 1, metro aéreo y línea 2, metro subterráneo.
- En caso de generarse asentamientos establecer claramente responsabilidades y los procesos de reforzamiento.
- Estudiar el impacto de la construcción de obras en los humedales.
- Necesidad de reglamentar la obligación de exigir en edificaciones con sótanos excavaciones estancas (para no abatir el nivel freático).
- En unos 100 años Bogotá ha perdido unas 49.000 ha de humedales sobre los que se han construido aproximadamente 1'000.000 de edificaciones con casi la tercera parte de habitantes de la ciudad, causantes de la subsidencia, los asentamientos y daños en estas mismas edificaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, P. (2013). *Catedral Metropolitana. Hundimiento y rescate*. Chapter II. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería, México. Texto en línea consultado el día 22 de marzo de 2025 en: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=catedral+metropolitana+hundimiento+y+rescate&btnG=
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2010). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente: NSR-10*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Libro en línea consultado el día 3 de abril de 2025 en: https://scholar.google.com/scholar?start=10&q=norma+nsr-10&hl=es&as_sdt=0,5
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Libro en línea consultado el día 3 de abril de 2025 en: https://www.google.com/search?q=mecanica+de+suelos+y+cimentaciones+carlos+crespo+villalaz+pdf&rlz=1C1FKPE_esCO1097CO1097&oq=Mecanica+de+suelos+y+cimentaciones+Carlos+crespo&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUqCAgBEAAYFhqeMgYIABBFgDkyCAgBEAAYFhqeMgqIAhAAGBYHjIHCAmQ

[ABjvBTIKCAQQABiiBBiJBTHCAUQABjvBTIKCAYQABiABBiiBDIGCAcQR
Rq80gEIMji5NWowajeoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://scholar.google.es/scholar?q=LOS+SUELOS+VOLC%C3%81NIC+O-LACUSTRES+DE+LA+CIUDAD+DE+M%C3%89XICO&hl=es&as_sdt=0,5)

- Díaz-Rodríguez, J. A. (2006). *Los suelos Volcánico-lacustres de la ciudad de México*. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 6(2), 44. Texto en línea consultado el día 20 de marzo de 2025 en: https://scholar.google.es/scholar?q=LOS+SUELOS+VOLC%C3%81NIC+O-LACUSTRES+DE+LA+CIUDAD+DE+M%C3%89XICO&hl=es&as_sdt=0,5
- Fondo de Prevención. *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismoresistente de edificaciones*, 2010. Informe en línea consultado el día 26 de marzo de 2025 en: https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&scioq=plan+ambiental+de+la+cuenca+alta+del+rio+bogota+thomas+van+der+hammen&q=zonificacion+de+las+respuesta+sismica+de+bogota&btnG=
- Gómez Cubillos, F. O., Martínez Balaguera, O. I., & Cristancho Franco, Y. A. (2007). *Análisis de asentamientos secundarios en los suelos de la zona del lago en la ciudad de Bogotá DC*. Trabajo de grado en línea consultado el día 30 de marzo de 2025 en: https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&scioq=plan+ambiental+de+la+cuenca+alta+del+rio+bogota+thomas+van+der+hammen&q=AN%C3%81LISIS+DE+ASENTAMIENTOS+SECUNDARIOS+EN+LOS+SUELOS+DE+LA++ZONA+DEL+LAGO+EN+LA+CIUDAD+DE+BOGOT%C3%81+D.C.&btnG=
- González Díaz, M. (2021, 15 de mayo) "No volverá a poblarse jamás: los 5 años en los que Ciudad de México "desapareció". BBC News Mundo en México. Artículo en línea consultado el día 20 de marzo de 2025, en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-57095125>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2024, 8 de mayo) *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*. Normativa Legal. Texto en línea consultado el día 20 de marzo de 2025 en: <https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/index.php/leyes/reglamentos/35-#reglamento-de-construcciones-para-el-distrito-federal>
- Hammen, T. V. D. (1998). *Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá: análisis y orientaciones para el ordenamiento territorial*. Libro en línea consultado el día 23 de marzo de 2025 en: https://scholar.google.com/scholar?q=related:y4qSPIbGFS0J:scholar.google.com/&scioq=plan+ambiental+de+la+cuenca+alta+del+rio+bogota+thomas+van+der+hammen&hl=es&as_sdt=0,5

- Lesser Illades, J. M., & Cortés Pérez, M. Ángel. (2015). *El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje*. Tecnología Y Ciencias Del Agua, 13(3), 13–18. Texto en línea consultado el día 22 de marzo de 2025 en: <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/805>
- Lermo-Samaniego, J. F., Sanchez-Serma, F. J., Ramos-Perez, E., Alvares-Monroy, I., Jimenez-Mendez, N., Torres-Cuenca, R., & Machado-Gonzalez, O. R. (2020). *Actualización de la zonificación sísmica de la ciudad de México y áreas aledañas-Parte norte*. Technical report. Texto en línea consultado el día 18 de marzo de 2025, en: https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&scioq=plan+ambiental+de+la+cuenca+alta+del+rio+bogota+thomas+van+der+hammen&q=Actualizaci%C3%B3n+de+la+zonificaci%C3%B3n+s%C3%ADsmica+de+la+Ciudad+de+M%C3%A9xico+y+%C3%A1reas+aleda%C3%B1as-Parte+Norte.+&btnG=
- López Pertuz, J. C. (2013, 11 de octubre). *Tres conjuntos se hunden en Bogotá*. Blogspot. Artículo en línea consultado el día 30 de marzo de 2025 en: <https://juancarloslopezpertuz.blogspot.com/2013/10/tres-conjuntos-se-hunden-gravemente-en.html>
- Orozco, L. F. (2006). *Asentamientos de fundaciones en la arcilla de Bogotá. Encuentro de Suelos y Estructuras. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*, 53. Informe en línea consultado el día 26 de marzo de 2025 en: https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&scioq=plan+ambiental+de+la+cuenca+alta+del+rio+bogota+thomas+van+der+hammen&q=ASENTAMIENTOS+DE+FUNDACIONES+EN+LA+ARCILLA+BOGOT%C3%81&btnG=
- Sierra, K. I. A. (2024). *Asentamientos diferenciales en edificios de zona lacustre de Bogotá: causas y casos de estudio*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Trabajo de grado en línea consultado el día 28 de marzo de 2025 en: https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&scioq=plan+ambiental+de+la+cuenca+alta+del+rio+bogota+thomas+van+der+hammen&q=ASENTAMIENTOS+DIFERENCIALES+EN+EDIFICIOS+DE+ZONA+LACUSTRE+DE+BOGOT%C3%81%3A+CAUSAS+Y+CASOS+DE+ESTUDIO&btnG=

