

Tipologías geotécnicas representativas de Boyacá y su influencia en la cimentación de viviendas no convencionales

Jardiel Santiago Acevedo Pérez

Yuri Karina Farias Sosa

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero civil

Director

Juan Ricardo Pérez Cuervo

Magister en Dirección y Gestión de Proyectos

Co-Directora

Nydia Margarita Habran Esteban

PhD Ingeniería de Materiales

Universidad Santo Tomás, Tunja

División de Arquitectura e Ingenierías

ingeniería Civil

2026

Dedicatoria

Este trabajo de grado cierra un capítulo muy importante de mi vida que representa principalmente gratitud a Dios y a la Virgen del Carmen, por acompañarme y darme fortaleza en cada paso de este camino.

Dedico este trabajo a mi mamá Rosa María Pérez, por su apoyo constante, su amor incondicional y por sus enseñanzas; A mi papá Daniel Acevedo, por su apoyo y confianza; y a mi hermana Jennifer Acevedo, por estar siempre presente.

De igual manera dedico este logro a mis amigos, quienes con su apoyo, paciencia y palabras de ánimo hicieron posible que este esfuerzo valiera la pena.

Este trabajo de grado representa un logro alcanzado con mucho sacrificio, constancia y dedicación, y es reflejo de todo el camino recorrido para cumplir este sueño profesional.

Jardiel Santiago Acevedo Pérez

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios, por darme la fuerza, la paciencia y la fe necesarias para no rendirme en los momentos más difíciles, y a la Virgen del Carmen, por su protección constante a lo largo de este camino.

A mi mamá Rosa María Pérez, por su amor incondicional, por estar siempre a mi lado y por ser mi mayor apoyo en cada etapa de este proceso. Gracias por creer siempre en mí; siempre serás mi mayor orgullo y mi inspiración en cada paso.

A mi papá Daniel Acevedo, por el respaldo económico brindado y por confiar en mi incluso en los momentos más complejos.

A mi hermana Jennifer Acevedo, por su compañía, comprensión y su gran apoyo a lo largo de este proceso.

A mi compañera de tesis, por el trabajo conjunto, el compromiso, la responsabilidad y el apoyo constante durante el desarrollo de esta investigación. Su disposición, esfuerzo y colaboración fueron fundamentales para superar las dificultades propias del proceso y alcanzar los objetivos propuestos.

A don Omar Alarcón, amigos y compañeros, por su apoyo, sus palabras de aliento y por acompañarme durante este proceso académico.

Asimismo, expreso un sincero agradecimiento a mi director de trabajo de grado, por su acompañamiento, orientación y disposición durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a la Universidad Santo Tomás, a la Facultad de Ingeniería Civil y a los docentes que aportaron sus conocimientos y orientación, contribuyendo de manera significativa a mi formación profesional y al desarrollo de este trabajo de grado.

Jardiel Santiago Acevedo Pérez

Dedicatoria

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida. Su guía ha sido mi apoyo en los momentos de dificultad y la luz que me permitió no rendirme.

A mis padres, Julie Sosa y Elver Farías, por su amor incondicional, sus sacrificios y su apoyo constante. Este logro también les pertenece, porque cada paso que doy está construido sobre los valores y enseñanzas que me han brindado. Gracias por confiar en mí y por acompañarme en cada etapa de este camino.

A mi hermana Sofía, por ser una motivación silenciosa y una alegría constante en mi vida. Su presencia me recuerda cada día la importancia de seguir esforzándome y dar ejemplo. Este logro también es para ella.

Este triunfo no es solo mío, sino de quienes han caminado conmigo y han sido parte esencial de este proceso.

Yuri Karina Farias Sosa

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, por darme la vida y sostenerme en cada etapa de este proceso, brindándome claridad en los momentos de incertidumbre y la fortaleza necesaria para culminar este trabajo. Su presencia fue una guía constante a lo largo de este camino.

A mi familia, por ser mi base y mi apoyo inquebrantable. Su comprensión durante las horas de esfuerzo, su paciencia y su amor hicieron posible alcanzar esta meta. Cada avance logrado está profundamente ligado a su respaldo y confianza en mí.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, por su compromiso académico, orientación y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. Sus aportes y su disposición para compartir conocimiento fueron fundamentales para la consolidación de este proyecto.

A mis compañeros y a todas las personas que me brindaron apoyo emocional, motivación y comprensión a lo largo de este proceso, contribuyendo a que este camino fuera más llevadero.

Finalmente, agradezco a mi compañero de tesis por la cooperación, el respeto y el esfuerzo compartido. El trabajo en equipo fue esencial para superar los retos y cumplir los objetivos planteados.

Yuri Karina Farias Sosa

Contenido

Introducción	16
1.1 Planteamiento del problema: Desafíos geotécnicos de las viviendas livianas en Boyacá. .	17
1.2 Justificación: Vulnerabilidad estructural ante suelos expansivos y colapsables.....	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.4 Alcance y Limitaciones (Enfoque en litoestratigrafía local).....	20
2. Marco referencial	21
2.1 Marco teórico	22
2.1.1 Caracterización geológica y geomorfológica de Boyacá	22
2.1.1.1 Contexto litoestratigráfico: Unidades geológicas predominantes	22
2.1.1.2 Geomorfología y unidades de paisaje: Relación entre vertientes y estabilidad de laderas.....	27
2.1.1.3 Amenaza sísmica y parámetros de sitio: clasificación según NSR-10 por tipologías.	31
2.1.2 Marco geotécnico: comportamiento mecánico de los suelos	36
2.1.2.1 Transición de la clasificación (IGAC) al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	36
2.1.2.1.1 Subdivisiones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	37
2.1.2.2 Propiedades físico-mecánica de suelos típicos según tipologías geotécnicas	39
2.1.2.3 Fenomenología de Suelos Especiales en Boyacá: Suelos derivados de cenizas volcánicas y depósitos coluviales.....	42

2.1.3 Viviendas no convencionales y sistemas estructurales	44
2.1.4 Desarrollo metodológico: modelación e interacción suelo– estructura	49
2.1.5 Análisis técnico y propuesta de diseño	52
2.2 Marco conceptual	54
2.3 Marco legal.....	55
3. Método	56
3.1 Fase I: Caracterización geológica y delimitación de tipologías geotécnicas	56
3.2 Fase II: Evaluación normativa y parámetros de sitio (NSR-10)	57
3.3 Fase III. Análisis técnico de sistemas de cimentación e interacción suelo–estructura	57
3.4 Fase IV. Evaluación constructiva.....	57
4. Resultados	58
5. Discusión.....	80
6. Conclusiones	82
7. Recomendaciones	85
8 Referencias.....	86
Apéndices.....	92

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Escala de tiempo geológico</i>	23
Tabla 2. <i>Subdivisiones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)</i>	37
Tabla 3. <i>Clasificación tipos de suelos en Boyacá</i>	39
Tabla 4. <i>Relación entre tipología de suelo, riesgo geotécnico y sistema de cimentación recomendado</i>	70
Tabla 5. <i>Matriz de recomendaciones de cimentación basada en la clasificación geotécnica del suelo y riesgos asociados</i>	75
Tabla 6. <i>Criterios técnicos de profundidad de desplante (Df) según tipología geotécnica</i>	76

Lista de figuras

Figura 1. Mapa geológico de Boyacá	26
Figura 2. <i>Mapa de amenaza por deslizamiento</i>	31
Figura 3. <i>Mapa Zona de Amenaza Sísmica en Colombia</i>	32
Figura 4. <i>Riesgo sísmico en el departamento de Boyacá y origen de los sismos en los últimos 50 años</i>	34
Figura 5. <i>Mapa amenaza sísmica periodo de retorno 475 años</i>	35
Figura 6. Modelo conceptual de interacción suelo-estructura mediante reacción del terreno tipo Winkler.	50
Figura 7. <i>Perfil estratigráfico de suelos finos cohesivos (CL)</i>	61
Figura 8. <i>Perfil estratigráfico suelos granulares.....</i>	63
Figura 9. <i>Perfil estratigráfico suelos orgánicos y rellenos blandos</i>	65
Figura 10. <i>Perfil estratigráfico depósitos coluviales de ladera.....</i>	67
Figura 11. <i>Perfil estratigráfico suelos residuales sobre roca</i>	68
Figura 12. <i>Placa flotante rígida continua.....</i>	77
Figura 13. <i>Zapatas aisladas conectadas con vigas de amarre</i>	77
Figura 14. <i>Micropilotes o elementos hincados (sistema profundo)</i>	78
Figura 15. <i>Placa continua rígida con apoyo profundo parcial</i>	79
Figura 16. <i>Zapatas superficiales sobre estrato competente verificado</i>	80
Figura 17. <i>Delimitación de cimentación</i>	93
Figura 18. <i>Acero de refuerzo en cimentación</i>	94
Figura 19. <i>Losa de cimentación</i>	95

Lista de apéndices

Apéndice A. <i>Memorias de Cálculo (Predimensionamiento)</i>	92
Apéndice B. <i>Modelo cimentación</i>	93

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo establecer criterios geotécnicos basados en tipologías de suelo para la selección y el diseño de sistemas de cimentación aplicables a viviendas no convencionales ubicadas en zonas rurales del departamento de Boyacá, Colombia. El estudio se desarrolla considerando la alta heterogeneidad geológica y geotécnica del territorio, así como la interacción suelo–estructura propia de edificaciones con sistemas estructurales livianos. La caracterización del suelo se aborda mediante la aplicación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), lo que permite identificar tipologías geotécnicas con comportamientos mecánicos similares y analizar fenómenos asociados como asentamientos diferenciales, levantamientos inducidos por variaciones en el contenido de agua y pérdida de capacidad portante. A partir de información geotécnica secundaria, análisis bibliográfico y revisión normativa, se definen perfiles estratigráficos tipo y se evalúa el desempeño de distintos sistemas de cimentación mediante análisis conceptual de interacción suelo–estructura. El estudio integra los lineamientos de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10, considerando la amenaza sísmica regional y los parámetros de sitio asociados a las condiciones del suelo, con el fin de garantizar la compatibilidad entre la cimentación y la superestructura liviana. Como resultado, se propone una matriz de decisión geotécnica y un conjunto de recomendaciones técnicas que relacionan las tipologías de suelo, las condiciones geomorfológicas y los sistemas estructurales livianos con alternativas de cimentación técnicamente viables, orientadas a mejorar el desempeño estructural y la seguridad de las viviendas no convencionales en el ámbito rural.

Palabras clave: cimentación, suelo, viviendas no convencionales, estabilidad del terreno, diseño estructural

Abstract

This research aims to establish geotechnical criteria based on soil typologies for the selection and design of foundation systems applicable to non-conventional housing located in rural areas of the department of Boyacá, Colombia. The study is developed considering the high geological and geotechnical heterogeneity of the region, as well as the soil–structure interaction characteristics of lightweight structural systems. Soil characterization is carried out through the application of the Unified Soil Classification System (USCS), which allows the identification of geotechnical soil typologies with similar mechanical behavior and the analysis of phenomena such as differential settlements, uplift induced by moisture variations, and loss of bearing capacity. Based on secondary geotechnical information, bibliographic analysis, and regulatory review, representative stratigraphic profiles are defined and the performance of different foundation systems is evaluated using simplified soil–structure interaction models. The study incorporates the guidelines of the Colombian Seismic Resistant Code NSR-10, considering regional seismic hazard and site parameters associated with soil conditions, in order to ensure compatibility between the foundation system and the lightweight superstructure. As a result, a geotechnical decision matrix and a set of technical recommendations are proposed, linking soil typologies, geomorphological conditions, and lightweight structural systems with technically viable foundation alternatives aimed at improving structural performance and safety in non-conventional rural housing.

Keywords: foundations, soil, unconventional housing, ground stability, structural design

Glosario

Amenaza sísmica: es la probabilidad de que en un lugar determinado ocurra un sismo con cierta intensidad capaz de producir daños (Ministerio de Vivienda C. y., 2014).

Asentamiento: son deformaciones verticales del suelo producidas por la aplicación de cargas estructurales, las cuales pueden afectar el desempeño de una edificación (INVIAS, 2020).

Asentamiento diferencial: ocurre cuando distintas partes de una estructura se hunden de manera desigual, generando grietas y daños estructurales (INVIAS, 2020).

Autoconstrucción: es el proceso mediante el cual los propios usuarios participan directa o totalmente en la construcción de su vivienda, generalmente sin asistencia técnica especializada (Universidad de Chile, 2005)

Capacidad portante: se define como la máxima presión que un terreno puede soportar de forma segura sin experimentar fallas por corte ni deformaciones excesivas que comprometan la estabilidad de la estructura (Terzagui, K., 1943).

Cimentación: parte de una estructura que está en contacto con el terreno, que se apoya en él, y al que transmite las cargas de modo que éste las pueda soportar, sin agotar su capacidad portante y sin provocar deformaciones excesivas (Alcalá, 2023).

Cimentación profunda: Son elementos estructurales que sirven para apoyar y fijar una construcción al terreno. Se caracterizan por tener una profundidad generalmente mayor a los 3 metros y se emplean cuando el terreno superficial es poco resistente o presenta problemas como suelos blandos, arcillosos o con presencia de agua (CONARSAC, 2023b).

Clasificación de suelos (SUCS): El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es una herramienta de la ingeniería geotécnica que permite categorizar los suelos en cinco tipos principales: gravas (G), arenas (S), arcillas (C), limos (M) y orgánicos (O) (Ingeotécnica, s.f.).

Compactación del suelo: es el proceso mediante el cual se reduce el volumen de vacíos del suelo aplicando energía mecánica, aumentando su densidad, resistencia y estabilidad, y reduciendo asentamientos futuros (Ministerio de Vivienda C. y., 2010).

Diseño sismo resistente: es el conjunto de criterios técnicos que buscan que una estructura resista los efectos de un sismo sin colapsar, protegiendo la vida de los ocupantes y limitando los daños estructurales (Sísmica, 2010).

Estabilidad del terreno: capacidad del suelo para mantenerse firme y resistir movimientos no deseados, tales como graduales o colapsos, lo cual es fundamental para garantizar la seguridad de las estructuras y prevenir desastres (EGC, 2023).

Geotecnia: Se encarga de estudiar el suelo y el subsuelo para identificar sus propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas, con el fin de apoyar análisis como la microzonificación sísmica, el modelado 3D del subsuelo y la selección del tipo de cimentación que garantice la estabilidad de las estructuras. (Rodríguez González, J. L., & Gualdrón Alfonso, D. F, 2018)

Interacción suelo-estructura: fenómeno mediante el cual el comportamiento mecánico de una estructura y el del suelo que la soporta se influyen mutuamente cuando el sistema es sometido a cargas estáticas o dinámicas. En este proceso, la deformabilidad del terreno modifica la respuesta estructural (desplazamientos, fuerzas internas y frecuencias naturales), mientras que la rigidez, masa y configuración de la estructura alteran la distribución de esfuerzos y deformaciones en el suelo. Por tanto, la respuesta real del sistema no puede evaluarse considerando de forma independiente el análisis estructural y el geotécnico, sino como un sistema acoplado suelo–cimentación–superestructura (Gazetas, G., 1991) (Wolf, J. P., 1985).

Nivel freático: el nivel que alcanza el agua subterránea en un acuífero no confinado (o acuífero libre), el cual se encuentra en contacto directo con la presión atmosférica. Profundidad de

la superficie de un acuífero libre con respecto a la superficie del terreno. Superficie en la zona de saturación de un acuífero libre sometido a la presión atmosférica (IDEAM, 2024).

Riesgo geotécnico: Se refiere a la identificación y delimitación de zonas susceptibles de sufrir fenómenos de inestabilidad del terreno, tales como licuación, movimientos de remoción en masa o presencia de suelos expansivos (Rodríguez González, J. L., & Gualdrón Alfonso, D. F, 2018).

Riesgo sísmico: Es la vulnerabilidad de una zona ante eventos sísmicos, determinada por la respuesta del suelo (espectros de diseño) y la capacidad de las edificaciones para soportar ondas vibratorias (Rodríguez González, J. L., & Gualdrón Alfonso, D. F, 2018).

Sostenibilidad en la construcción: implica el uso responsable de recursos, la reducción del impacto ambiental, la eficiencia energética y la durabilidad de las edificaciones, considerando factores sociales, económicos y ambientales (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2023).

Suelos expansivos: Son terrenos identificados como zonas de inestabilidad potencial que deben ser localizadas y delimitadas por la ingeniería geotécnica. Se analizan mediante bases de datos geoespaciales que evalúan las propiedades de las arcillas presentes en un área para visualizar su potencial de expansión y prevenir daños estructurales (Rodríguez González, J. L., & Gualdrón Alfonso, D. F, 2018).

Viviendas no convencionales: son aquellas que emplean sistemas constructivos o materiales no tradicionales y que, en muchos casos, no se ajustan completamente a la normativa técnica vigente (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2023), se entienden como edificaciones livianas, modulares y de bajo impacto constructivo (guadua, madera, steel frame, panelería liviana, entre otras).

Introducción

En las zonas rurales del departamento de Boyacá, la construcción de viviendas no convencionales mediante sistemas estructurales livianos se ha consolidado como una alternativa viable frente a las limitaciones económicas, la disponibilidad de materiales locales y los procesos de autoconstrucción. Este tipo de edificaciones, que emplean tipologías estructurales como steel frame, wood frame y guadua, se caracterizan por un bajo peso estructural y una reducida rigidez global, condiciones que modifican de manera significativa su interacción con el suelo de cimentación y las hacen especialmente sensibles a deformaciones del terreno.

Boyacá presenta una alta heterogeneidad geológica y geotécnica, con presencia de arcillas de alta plasticidad, limos, arenas limosas, depósitos coluviales y suelos de origen volcánico, cuyos comportamientos mecánicos contrastantes pueden generar asentamientos diferenciales, levantamientos inducidos por variaciones de humedad y pérdida de capacidad portante. En este contexto, la aplicación de soluciones de cimentación estandarizadas, sin considerar las particularidades del suelo y la interacción suelo–estructura, incrementa el riesgo de fallas estructurales en viviendas livianas

La presente investigación tiene como objetivo establecer criterios geotécnicos basados en tipologías de suelo, definidas mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), para la selección y el diseño de sistemas de cimentación en viviendas no convencionales ubicadas en zonas rurales de Boyacá. Para ello, se integran el análisis del contexto geológico y geomorfológico, la evaluación de la interacción suelo–estructura y la aplicación de los lineamientos de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10, con el fin de proponer soluciones de cimentación técnicamente viables y compatibles con las condiciones locales del terreno.

1. Tipologías geotécnicas representativas de Boyacá y su influencia en la cimentación de viviendas no convencionales

1.1 Planteamiento del problema: Desafíos geotécnicos de las viviendas livianas en Boyacá.

Las viviendas livianas, construidas con materiales de bajo peso y sistemas modulares, dependen en gran medida de la interacción entre la estructura y el suelo que las soporta. Desde un enfoque **geotécnico–constructivo**, aunque generan menores cargas que las edificaciones tradicionales, pueden ser vulnerables a asentamientos diferenciales, deformaciones del terreno y cambios en la humedad del suelo si no se realiza una adecuada evaluación de las condiciones del terreno y de la compatibilidad con el sistema de cimentación.

En el departamento de Boyacá existe una alta heterogeneidad geológica y geotécnica, lo que produce una gran variabilidad en el comportamiento mecánico de los suelos. Bajo este enfoque, se identifican cinco tipologías predominantes que influyen directamente en la selección de cimentaciones: suelos finos cohesivos, suelos granulares, suelos orgánicos y rellenos blandos, depósitos coluviales de ladera y suelos residuales sobre roca, los cuales pueden generar problemas como pérdida de capacidad portante, asentamientos e inestabilidad del terreno.

Debido a la extensión territorial y diversidad geológica del departamento, la investigación propone agrupar suelos con comportamientos similares en tipologías geotécnicas representativas, facilitando la formulación de criterios para la selección de cimentaciones adecuadas en viviendas no convencionales. Asimismo, se evidencia que en muchas zonas rurales se emplean soluciones tradicionales sin estudios geotécnicos, lo que incrementa el riesgo de fallas estructurales. Aunque la **NSR-10** establece lineamientos generales, su alcance resulta limitado frente a la diversidad de suelos y a las particularidades constructivas de las edificaciones livianas en Boyacá.

Pregunta de investigación

¿Cuáles son los principales desafíos geotécnicos que enfrentan las viviendas livianas en Boyacá y cómo pueden abordarse mediante sistemas de cimentación adaptados a tipologías de suelo representativas, considerando criterios técnicos, normativos y de viabilidad constructiva?

1.2 Justificación: Vulnerabilidad estructural ante suelos expansivos y colapsables.

La vulnerabilidad estructural de las viviendas livianas en zonas rurales de Boyacá se encuentra directamente asociada al comportamiento geotécnico del suelo. En diferentes sectores del departamento predominan suelos finos de alta plasticidad y materiales colapsables, cuya respuesta frente a variaciones de humedad puede generar cambios volumétricos, pérdida de capacidad portante y asentamientos diferenciales, afectando la estabilidad de las edificaciones cuando no se consideran criterios adecuados en el diseño de cimentaciones.

Desde la interacción suelo–estructura, las viviendas livianas transmiten cargas reducidas al terreno, lo que disminuye su capacidad para contrarrestar presiones de subpresión asociadas al hinchamiento de arcillas expansivas. Esto puede provocar levantamientos parciales de la cimentación, fisuración de elementos estructurales y deformaciones incompatibles, comprometiendo el desempeño estructural incluso cuando los asentamientos totales son moderados.

Aunque el Título H de la NSR-10 establece lineamientos generales para el diseño de cimentaciones, no desarrolla de forma específica los efectos de subpresión en sistemas estructurales livianos sobre suelos expansivos. Por ello, se plantea la necesidad de sistematizar soluciones de cimentación mediante un matriz de diseño tipo, que integre criterios de interacción suelo–estructura, control de humedad, confinamiento del suelo y aumento de rigidez del sistema

de apoyo, con el fin de reducir levantamientos, minimizar deformaciones diferenciales y mejorar la estabilidad estructural.

Finalmente, la investigación aporta herramientas técnicas aplicables a la vivienda rural, promoviendo soluciones constructivas seguras, viables y adaptadas a las condiciones geotécnicas de Boyacá, además de proponer un modelo metodológico replicable en regiones con condiciones similares.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Definir criterios técnicos para la selección de sistemas de cimentación en viviendas no convencionales rurales del departamento de Boyacá, con base en la evaluación del comportamiento geotécnico de las tipologías de suelo predominantes y en los lineamientos de la NSR-10, bajo el enfoque de compatibilidad suelo–estructura.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las tipologías de suelo predominantes en zonas rurales representativas del departamento de Boyacá, a partir del análisis de información geotécnica secundaria y fuentes técnicas oficiales, en función de sus propiedades y limitaciones para la selección de sistemas de cimentación.
- Analizar la relación entre la composición del suelo y el comportamiento de los sistemas de cimentación en viviendas no convencionales, considerando variables como capacidad portante, asentamientos, variaciones de humedad y amenaza sísmica.
- Aplicar los lineamientos establecidos en la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10, en lo referente a clasificación de suelos, zonificación sísmica y criterios generales de diseño

de cimentaciones, adaptándolos al contexto de viviendas no convencionales ubicadas en zonas rurales del departamento de Boyacá.

- Realizar un análisis comparativo del comportamiento estructural de sistemas de cimentación mediante análisis conceptual que representen la interacción suelo–estructura en tipologías típicas de viviendas no convencionales.
- Diseñar una matriz técnica guía de selección de cimentaciones que relacione las tipologías de suelo predominantes en municipios rurales de Boyacá con soluciones de cimentación compatibles con sistemas estructurales livianos, en concordancia con los lineamientos establecidos en la NSR-10.

1.4 Alcance y Limitaciones (Enfoque en litoestratigrafía local)

La investigación se desarrolla con un enfoque técnico–aplicado, orientado al análisis del comportamiento geotécnico de los suelos en zonas rurales de Boyacá y su relación con el diseño de sistemas de cimentación para viviendas no convencionales. El estudio se basa en la identificación, caracterización y agrupación de tipologías de suelo con comportamientos geomecánicos similares, utilizando información secundaria y su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El alcance se centra en cinco tipologías representativas: suelos finos cohesivos, suelos granulares, suelos orgánicos y rellenos blandos, depósitos coluviales de ladera y suelos residuales sobre roca, analizados desde un enfoque litoestratigráfico, que permite relacionar el origen de los materiales con sus propiedades físicas, mecánicas y su respuesta frente a solicitaciones estructurales en edificaciones livianas.

Metodológicamente, el estudio aborda la interacción suelo–estructura mediante análisis conceptuales aplicados a tipologías de viviendas no convencionales, evaluando el desempeño de

distintos sistemas de cimentación en condiciones geotécnicas heterogéneas. Como resultado, se propone una matriz geotécnica de recomendaciones, que relaciona tipos de suelo y sistemas de cimentación, considerando criterios técnicos, normativos y de viabilidad constructiva, en concordancia con el Título H de la NSR-10.

Como limitación, la investigación no incluye estudios geotécnicos de campo ni ensayos de laboratorio, por lo que la caracterización se basa en valores típicos reportados en literatura técnica. Por tanto, las recomendaciones no sustituyen estudios geotécnicos específicos, sino que funcionan como herramienta de apoyo para la selección preliminar de cimentaciones en contextos rurales.

Finalmente, aunque el estudio se enfoca en Boyacá, la metodología y los criterios técnicos propuestos pueden adaptarse a otras regiones con condiciones geotécnicas similares.

2. Marco referencial

Esta sección presenta los principios teóricos, conceptuales y normativos que sustentan el análisis del diseño y selección de sistemas de cimentación según la naturaleza del suelo para viviendas no convencionales en zonas rurales de Boyacá. El enfoque se basa en la clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el análisis de la interacción suelo–estructura y la aplicación de los lineamientos del Título H de la NSR-10.

Su finalidad es proporcionar el soporte conceptual y normativo para formular soluciones de cimentación seguras y compatibles con sistemas estructurales livianos, considerando las condiciones geotécnicas del terreno. Asimismo, establece las bases para la definición de perfiles estratigráficos tipo, la asignación de parámetros representativos y la evaluación del desempeño de cimentaciones frente a asentamientos diferenciales y levantamientos por variaciones de humedad.

2.1 Marco teórico

En El marco teórico reúne los conceptos, teorías y antecedentes técnicos relacionados con el comportamiento mecánico de los suelos, la interacción suelo–estructura y los sistemas de cimentación para viviendas no convencionales. También incluye los criterios de clasificación geotécnica mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y los lineamientos de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10, que constituyen la base conceptual para el análisis, la modelación y la formulación de propuestas de cimentación del estudio.

2.1.1 Caracterización geológica y geomorfológica de Boyacá

2.1.1.1 Contexto litoestratigráfico: Unidades geológicas predominantes

El departamento de Boyacá está situado principalmente en la Cordillera de los Andes, integrando cuatro cuencas de sedimentación (Cuenca Valle Medio del Magdalena, Cordillera Oriental, Sierra Nevada del Cocuy y Cuenca del Piedemonte Llanero), una provincia geológica caracterizada por una evolución de procesos tectónicos y sedimentarios, con predominio de rocas sedimentarias mesozoicas–cenozoicas plegadas y falladas, además de depósitos cuaternarios asociados a dinámicas fluviales y de ladera. La cartografía geológica departamental compila un conjunto amplio de unidades estratigráficas que reflejan cambios en ambientes de sedimentación y eventos tectónicos regionales, condicionando de manera directa los materiales parentales y los procesos de meteorización que originan los suelos superficiales (Servicio Geológico Colombiano, 2023).

Las edades de los diversos suelos y las variadas rocas presentes en el departamento son bastante heterogéneas, destacando las amplias y robustas secuencias de rocas sedimentarias que datan del Precámbrico hasta el Neógeno (**ver tabla 1**).

Tabla 1. *Escala de tiempo geológico*

ERAS	PERÍODOS	ÉPOCAS	EDADES (en millones de años)
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	0.01
		Pleistoceno	1.6
	NEÓGENO	Plioceno	5.3
		Mioceno	23.7
		Oligoceno	36.6
		Eoceno	57.8
	PALEÓGENO	Paleoceno	66.4
			144
	CRETÁCEO		208
	JURÁSICO		240
MESOZOICO	TRIÁSICO		286
	PÉRMICO		360
	CARBONÍFERO		408
	DEVÓNICO		438
	SILÚRICO		505
PALEOZOICO	ORDOVÍCIO		570
	CÁMBRICO		2500
	PROTEROZOICO		3800
PRECÁMBRICO	AZOICO		

Fuente: (Geological Society of America, 1983)

A nivel departamental se reconocen extensas áreas dominadas por rocas sedimentarias finas, tales como lutitas, arcillolitas y limolitas, intercaladas con areniscas y niveles carbonosos, junto con unidades más competentes como areniscas cementadas y calizas, además de coberturas cuaternarias asociadas a valles y planicies aluviales. Estas relaciones se evidencian en la cartografía geológica regional y en estudios locales del altiplano (sector Tunja–Duitama), donde afloran unidades como las formaciones Guaduas y Bogotá, así como depósitos suprayacentes más jóvenes (Renzoni, G., 1981), (Servicio Geológico Colombiano, 2023)

Las arcillolitas, lutitas y limolitas suelen originar suelos finos de alta plasticidad y compresibilidad, susceptibles a deformaciones por cambios de humedad y consolidación. En contraste, las areniscas y depósitos aluviales con fracciones gruesas favorecen la formación de suelos granulares o mezclas granular–fino, asociados a mejor drenaje y mayor capacidad portante. En el altiplano cundiboyacense también se presenta la Formación Tilatá (Plioceno–Pleistoceno),

compuesta por gravas, conglomerados, arenas y arcillas, que generan perfiles heterogéneos con capas granulares y finas, influyendo en el comportamiento de cimentaciones superficiales y el control de asentamientos (Servicio Geológico Colombiano, 2023).

La configuración litoestratigráfica de Boyacá está influenciada por la tectónica de la Cordillera Oriental, asociada a procesos de plegamiento, fallamiento inverso y levantamiento diferencial durante el Cenozoico. Estos procesos controlaron la exposición de secuencias sedimentarias con distinta competencia mecánica, generando contrastes en los procesos de meteorización y formación de perfiles de suelo. Las lutitas y arcillolitas tienden a originar suelos finos de alta plasticidad, mientras que las areniscas y unidades más competentes producen suelos residuales más granulares o perfiles delgados sobre roca somera, generando condiciones geotécnicas heterogéneas a escala regional (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

A escala nacional, el Mapa Geológico de Colombia actualizado por el Servicio Geológico Colombiano integra la distribución y agrupación de unidades cronoestratigráficas y litológicas, constituyéndose en un marco de referencia para contextualizar la geología de Boyacá dentro de la Cordillera Oriental (Servicio Geológico Colombiano, 2023), contando con condiciones heterogéneas para el diseño de cimentaciones en vivienda rural.

De acuerdo, al Mapa Geológico de Boyacá (**ver figura 1**) a continuación se describen las localizaciones geográficas del departamento de Boyacá:

Suelos finos cohesivos

Corresponden a materiales derivados de lutitas, arcillolitas y limolitas, presentes en amplias zonas del altiplano y la Cordillera Oriental. Estas secuencias arcillosas se identifican en los bloques Tunja–Duitama y Tota–Paz de Río, por lo que estos suelos son comunes en municipios como

Tunja, Duitama, Sogamoso, Paipa, Tota y Paz de Río, donde predominan formaciones sedimentarias finas del altiplano (INGEOMINAS , 2000).

Suelos granulares

Se asocian a areniscas, conglomerados y depósitos aluviales recientes, comunes en el Valle Medio del Magdalena y el piedemonte. Estos materiales pueden encontrarse en municipios como Puerto Boyacá, así como en terrazas y valles interandinos de Moniquirá, Chiquinquirá y Garagoa, donde predominan depósitos fluviales y formaciones arenosas (INGEOMINAS , 2000).

Suelos orgánicos y rellenos blandos

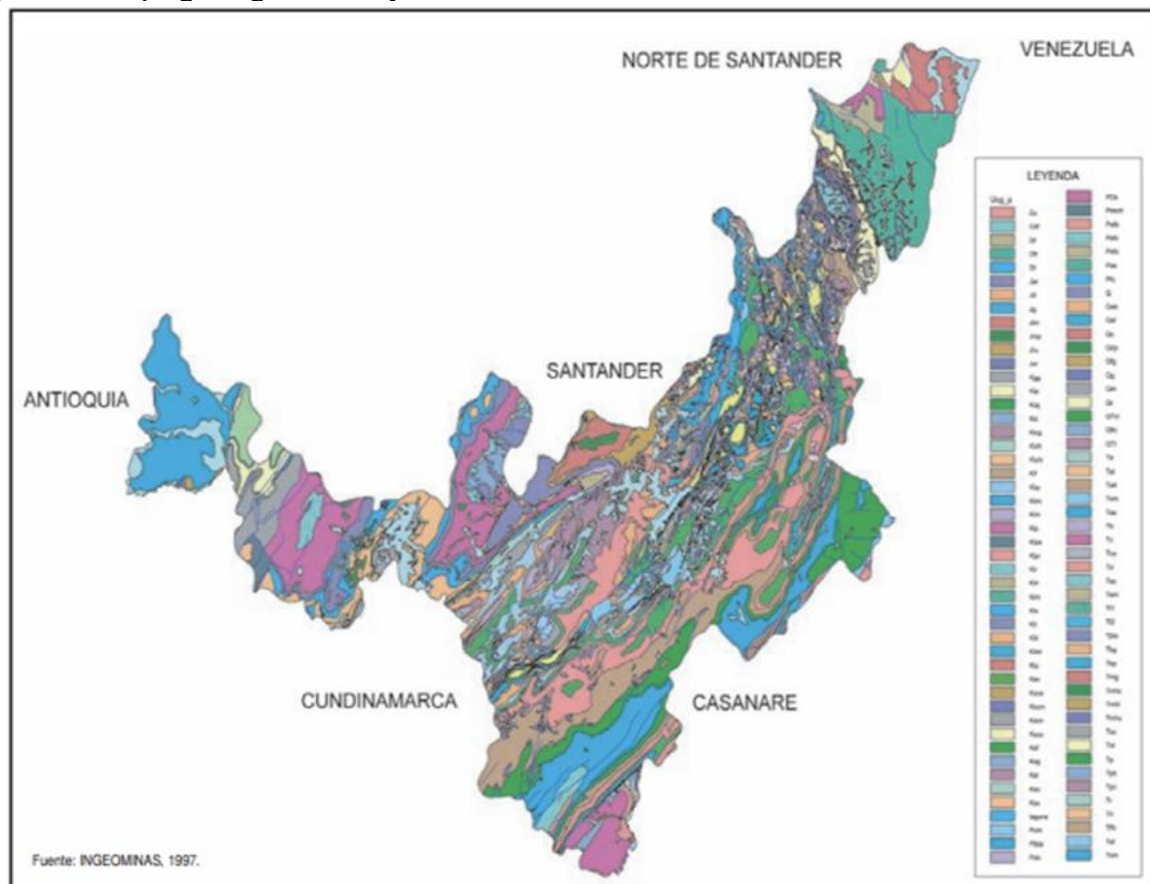
Se desarrollan en planicies aluviales y lacustres con drenaje deficiente, asociadas a depósitos recientes del altiplano. Estos suelos se localizan en municipios cercanos a cuerpos de agua como Aquitania (Laguna de Tota) y en zonas bajas de Sogamoso y la cuenca del río Chicamocha, donde predominan depósitos finos recientes (INGEOMINAS , 2000).

Depósitos coluviales de ladera

El informe describe terrenos quebrados y escarpados en la vertiente occidental y oriental de la Cordillera Oriental, donde se desarrollan depósitos de derrubio y materiales heterogéneos cuaternarios. Estos se presentan en municipios como Otanche, San Pablo de Borbur, Soatá, El Cocuy y Cubará, caracterizados por pendientes pronunciadas y procesos de remoción en masa (INGEOMINAS , 2000).

Suelos residuales sobre roca

Se originan por meteorización directa de rocas metamórficas e ígneas del Macizo de Floresta y otras unidades antiguas descritas en el documento. Son frecuentes en municipios como Nobsa, Corrales, Tasco, Santa Rosa de Viterbo y Floresta, donde afloran rocas cristalinas y metamórficas que generan perfiles residuales poco profundos (INGEOMINAS , 2000).

Figura 1. Mapa geológico de Boyacá

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2007)

La diversidad litoestratigráfica de Boyacá no solo define la naturaleza de los materiales parentales del suelo, sino que también condiciona la evolución del relieve y la dinámica geomorfológica regional. La distribución de arcillas, areniscas, lutitas y depósitos no consolidados influye en la resistencia de las vertientes, los procesos de erosión y la estabilidad de laderas, generando paisajes con comportamientos geotécnicos diferenciados. En este sentido, la geología constituye la base para comprender la organización geomorfológica del territorio, la cual controla la disposición espacial de los suelos y su respuesta frente a cargas estructurales. Por tanto, el análisis de las unidades de paisaje y su relación con la estabilidad de vertientes se aborda en el siguiente apartado como complemento necesario para interpretar integralmente el comportamiento del subsuelo (Servicio Geológico Colombiano, 2023).

2.1.1.2 Geomorfología y unidades de paisaje: Relación entre vertientes y estabilidad de laderas

La geomorfología de Boyacá resulta de la interacción entre tectónica, litología, clima y dinámica fluvial, generando unidades de paisaje como sistemas montañosos de la Cordillera Oriental (incluida la Sierra Nevada del Cocuy), lomeríos y altiplanos interandinos, y zonas de piedemonte y planicies hacia el Valle Medio del Magdalena, donde se ubica Puerto Boyacá. Estos paisajes reflejan la influencia de la tectónica y los procesos de erosión en la formación de valles interandinos, depresiones y planicies asociadas a grandes cuencas sedimentarias (Gobernación de Boyacá, 2018).

Montañas estructurales y erosionales

En las zonas montañosas predominan climas fríos a muy fríos, con relieves escarpados y pendientes pronunciadas. Los materiales parentales corresponden a rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias fracturadas, que originan suelos poco profundos, de textura media a fina y drenaje moderado. Estas áreas presentan alta susceptibilidad a erosión y remoción en masa, lo que limita el uso de cimentaciones convencionales y requiere soluciones adaptadas a terrenos inclinados, con medidas de estabilización y drenaje (SILVA, H. E., 2018).

Piedemontes y valles interandinos

En los sectores de piedemonte y en los valles interandinos se presentan relieves moderados, con pendientes medias y climas templados a fríos húmedos. Los materiales parentales están conformados principalmente por depósitos coluviales y aluviales recientes, lo que da lugar a suelos más profundos y relativamente estables. No obstante, estos suelos pueden presentar variaciones importantes en su drenaje y grado de compactación. En general, estas condiciones permiten la aplicación de cimentaciones superficiales o semiprofundas, siempre que se implementen medidas adecuadas de control de humedad y estabilidad frente a deslizamientos superficiales (SGC, 2007).

Zonas volcánicas y planicies fluviales

En las áreas de origen volcánico, los suelos derivados de cenizas y materiales piroclásticos presentan alta porosidad y textura fina. Aunque tienen buena permeabilidad, pueden perder cohesión al saturarse, por lo que requieren compactación y estabilización previa a la construcción (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Las planicies fluviales presentan relieves suaves y climas más cálidos, con suelos formados por depósitos aluviales. Estos suelos suelen ser profundos, fértiles y con buena infiltración, pero pueden presentar saturación temporal y baja resistencia al corte. Por ello, se recomienda el uso de cimentaciones superficiales reforzadas y sistemas de drenaje perimetral para evitar asentamientos diferenciales y pérdida de soporte (Das, B. M, 2016).

Altiplanicies estructurales y zonas de lomerío

Las altiplanicies estructurales se localizan en sectores de clima frío a muy frío húmedo, con relieves ondulados y materiales constituidos principalmente por limos, arcillas y rocas sedimentarias. Los suelos presentan textura media y drenaje moderado, aunque pueden presentar restricciones asociadas a compactación superficial y procesos de erosión (IGAC, 2012).

En los paisajes de lomerío, con clima templado a cálido y relieve suave, predominan suelos profundos con buena permeabilidad y drenaje natural, lo que favorece la construcción. Sin embargo, en periodos de lluvias intensas pueden presentarse saturación y pérdida temporal de capacidad portante, por lo que es necesario incorporar sistemas de drenaje y control de infiltración en las cimentaciones (SIERRA, J. J, 2020).

Dándole un enfoque geotécnico-constructivo, la distinción más relevante para vivienda rural corresponde a la diferencia entre:

En las **vertientes de ladera**, la pendiente y la disección del relieve favorecen procesos de remoción, transporte y acumulación de materiales, generando depósitos coluviales heterogéneos (bloques, gravas, arenas y finos). Estos materiales presentan comportamiento geotécnico variable y sensibilidad a cambios de humedad, lo que incrementa el riesgo de deformaciones diferenciales del terreno, especialmente en viviendas livianas si no se reconoce la naturaleza y continuidad del material (Velandia Nossa, F. A., 2015).

En **zonas de ladera**, los procesos gravitacionales generan depósitos coluviales heterogéneos y mal gradados, con variabilidad lateral, cambios abruptos de rigidez y zonas de debilidad, lo que representa un factor crítico para cimentaciones superficiales en estructuras livianas. Estas condiciones se asocian a pendientes con deslizamientos, reptación y solifluxión, donde los coluviones se depositan sobre unidades menos competentes (como secuencias arcillosas), incrementando la susceptibilidad a inestabilidad superficial (Alcaldía Municipal de Toledo., 2006)

En **planicies y fondos de valle** predominan sedimentos finos y niveles freáticos someros, que favorecen la presencia de suelos blandos con potencial de asentamientos a largo plazo y, en algunos casos, materia orgánica en zonas de drenaje deficiente. La interacción entre geomorfología e hidrología controla la saturación, infiltración y estabilidad superficial, factores que influyen en la pérdida temporal de resistencia y cambios volumétricos en suelos finos (Gobernación de Boyacá, 2018).

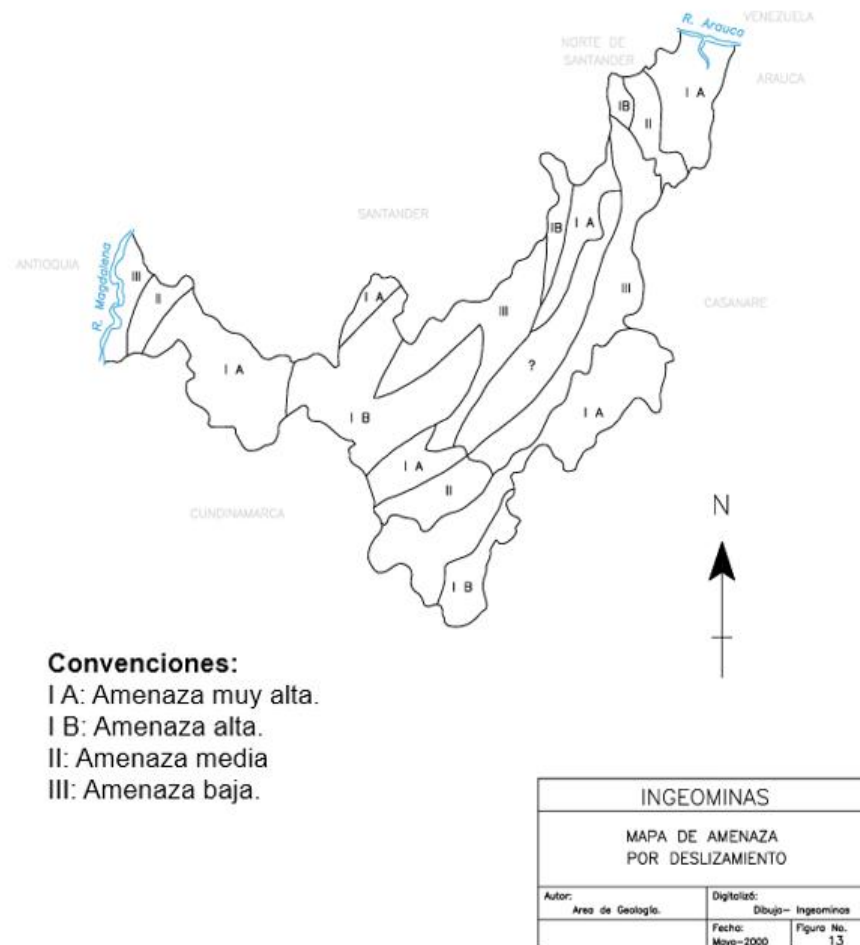
Los estudios del Servicio Geológico Colombiano sobre amenaza por movimientos en masa permiten identificar áreas propensas a inestabilidad, especialmente en entornos montañosos donde interactúan pendiente, material geológico, meteorización y precipitación (Servicio Geológico Colombiano, 2017). Por ello, la caracterización geomorfológica no solo describe el relieve, sino

que orienta decisiones de diseño de cimentaciones, al identificar zonas donde pueden presentarse deformaciones diferenciales, pérdida de soporte o cambios de humedad asociados a escurrimiento e infiltración en ladera.

En ambientes de vertiente, la geomorfología controla el espesor y la continuidad de los mantos de suelo. En pendientes medias a altas, los perfiles suelen ser delgados e irregulares, con transición rápida a roca meteorizada o sustrato competente. En contraste, las zonas de acumulación coluvial pueden presentar espesores importantes de material suelto con estratificación caótica y propiedades mecánicas variables. Esta heterogeneidad vertical y lateral genera incertidumbre en la respuesta del terreno frente a cargas estructurales, especialmente en cimentaciones superficiales de viviendas livianas, donde pequeñas variaciones de rigidez pueden producir asentamientos diferenciales (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Finalmente, en relación con las tipologías de suelo del estudio, en unidades de vertiente predominan depósitos coluviales de ladera y suelos residuales sobre roca cuando el sustrato se encuentra cercano a superficie. En valles y planicies aluviales es más común encontrar suelos granulares en terrazas y barras, y suelos finos cohesivos en llanuras de inundación, mientras que en zonas con drenaje deficiente pueden presentarse suelos orgánicos y rellenos blandos (SGC, 2007), (Gobernación de Boyacá, 2018).

La **Figura 2** presenta un mapa de Boyacá con la clasificación de amenaza por deslizamiento en cuatro categorías: muy alta (IA), alta (IB), media (II) y baja (III). La distribución de estas amenazas está asociada a las estructuras geológicas de la región, influenciadas por procesos tectónicos e inversión estructural. Las zonas de amenaza muy alta y alta se relacionan principalmente con fallas y discontinuidades estructurales, que generan bloques superpuestos y pendientes moderadas, condiciones favorables para la ocurrencia de deslizamientos.

Figura 2. Mapa de amenaza por deslizamiento

Fuente: INGEOMINAS, 2000

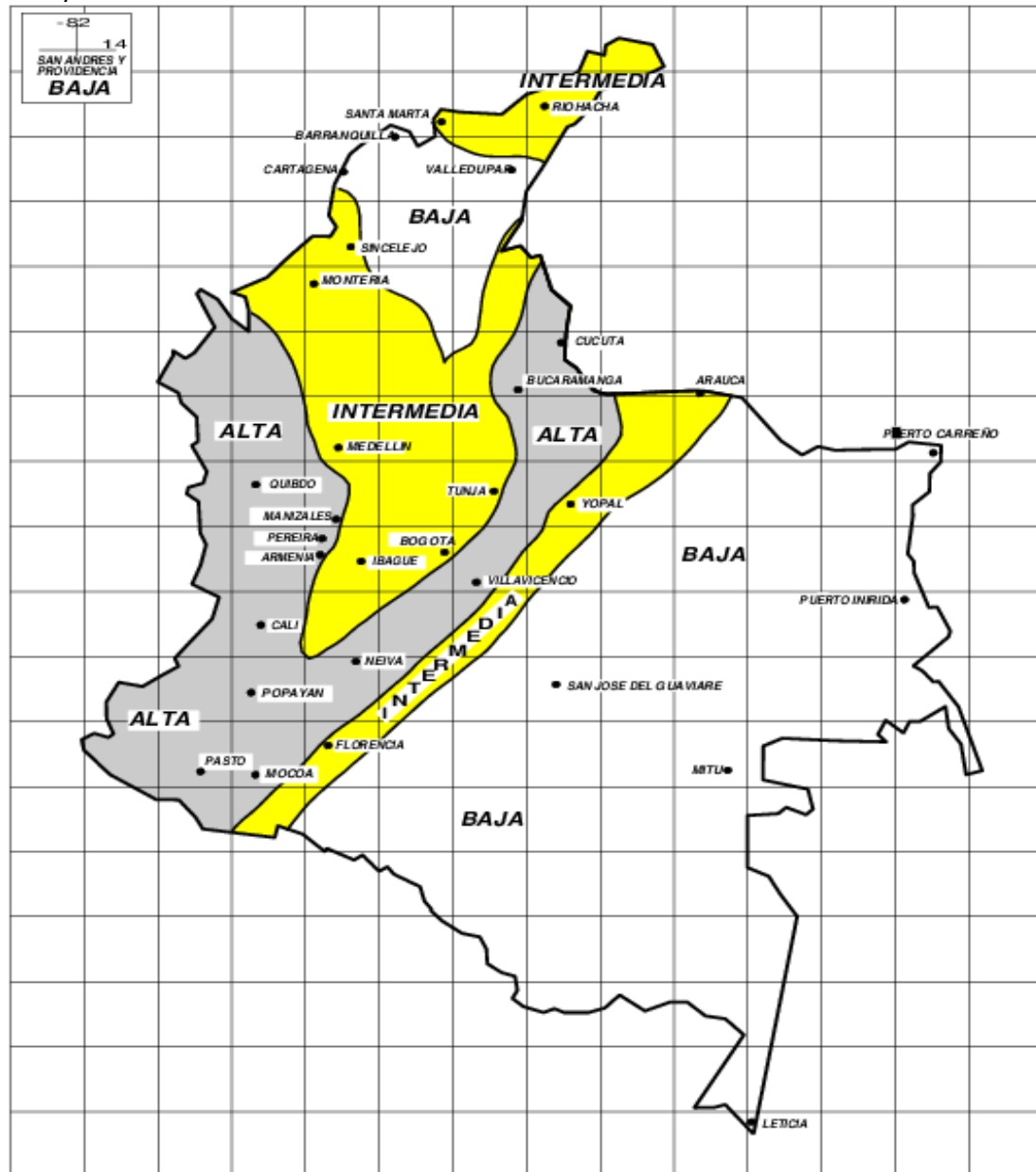
2.1.1.3 Amenaza sísmica y parámetros de sitio: clasificación según NSR-10 por tipologías.

La respuesta sísmica de una edificación depende no solo de la amenaza sísmica regional, sino también de las condiciones locales del suelo donde se ubica la cimentación. La NSR-10 incorpora este efecto mediante parámetros de sitio (NSR-10, Título H, H.2.2), que ajustan la acción sísmica de diseño según la rigidez, estratigrafía y deformabilidad del terreno (AIS, 2010). Por ello, la caracterización geotécnica es fundamental para el desempeño estructural, especialmente en viviendas livianas.

En esta investigación, la amenaza sísmica se analiza junto con las tipologías geotécnicas de suelo presentes en zonas rurales de Boyacá, reconociendo que cada tipo de suelo presenta

respuestas sísmicas diferentes y afecta la interacción suelo–estructura. La **Figura 3** muestra el mapa de amenaza sísmica de Colombia según la NSR-10, que clasifica el territorio en zonas de amenaza alta, intermedia y baja, las cuales orientan los criterios de diseño estructural y geotécnico.

Figura 3. Mapa Zona de Amenaza Sísmica en Colombia



Fuente: Ministerio de Ambiente, 2017

Los suelos finos cohesivos de plasticidad media a alta presentan mayor deformabilidad y amplificación de aceleraciones sísmicas, pudiendo generar incrementos de deformaciones y

presiones de poros, lo que favorece asentamientos diferenciales y pérdida temporal de rigidez, situación crítica para viviendas livianas debido a su baja masa estructural (Seed, H. B., & Idriss, I. M., 1970); (Kramer, S. L, 1996).

Los suelos granulares densos presentan mayor rigidez dinámica y menor amplificación sísmica; sin embargo, cuando tienen baja densidad relativa o se encuentran saturados, pueden experimentar redistribución de partículas y pérdida de resistencia al corte, produciendo deformaciones permanentes en las cimentaciones (Kramer, S. L, 1996), (Das, B. M, 2016). Por ello, la NSR-10 considera la calidad geotécnica y el grado de compactación en la clasificación del sitio (AIS, 2010), (NSR-10, Título H, H.2.3).

Los suelos orgánicos y rellenos blandos presentan baja rigidez, alta compresibilidad y comportamiento no lineal bajo cargas dinámicas, lo que puede amplificar aceleraciones sísmicas y generar deformaciones excesivas, comprometiendo la estabilidad de edificaciones livianas (Kramer, S. L, 1996) (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2011). En estos casos, la NSR-10 exige consideraciones especiales de diseño o mejoramiento del terreno (AIS, 2010).

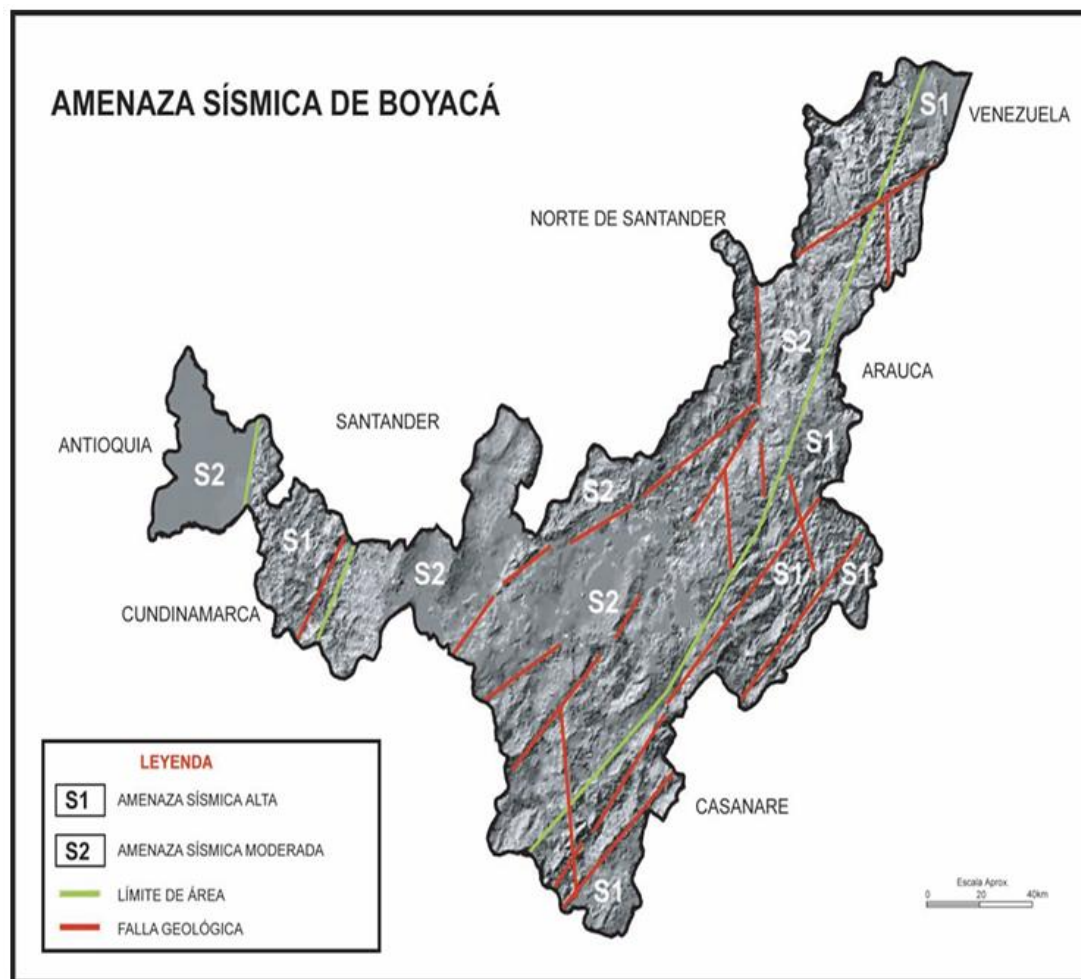
Los depósitos coluviales de ladera presentan respuesta sísmica compleja debido a su heterogeneidad granulométrica y variabilidad lateral, pudiendo generar deformaciones diferenciales e inestabilidad superficial, especialmente en zonas con pendiente, donde la aceleración sísmica puede desencadenar movimientos del terreno (Kramer, S. L, 1996) (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996).

Por su parte, los suelos residuales sobre roca suelen presentar una respuesta más rígida cuando la roca competente está cercana a la superficie, lo que reduce la amplificación sísmica. Sin embargo, la transición suelo-roca puede generar contrastes de rigidez que afectan la propagación de ondas y la distribución de esfuerzos en la cimentación (Seed, H. B., & Idriss, I. M., 1970)

(Kramer, S. L, 1996). Según la NSR-10, estas condiciones suelen corresponder a tipos de sitio más favorables, siempre que se verifique la calidad del material subyacente (AIS, 2010).

Finalmente, la **Figura 4** muestra la amenaza sísmica del departamento de Boyacá, clasificada en alta (S1) y moderada (S2). Las zonas de mayor riesgo se ubican principalmente hacia el oriente y nororiente del departamento, cercanas a Arauca, Casanare y Venezuela, donde también se identifican fallas geológicas activas que influyen en la ocurrencia de sismos. Esta información es fundamental para la planificación territorial y el diseño estructural en la región (IGAC, 2005)

Figura 4. Riesgo sísmico en el departamento de Boyacá y origen de los sismos en los últimos 50 años

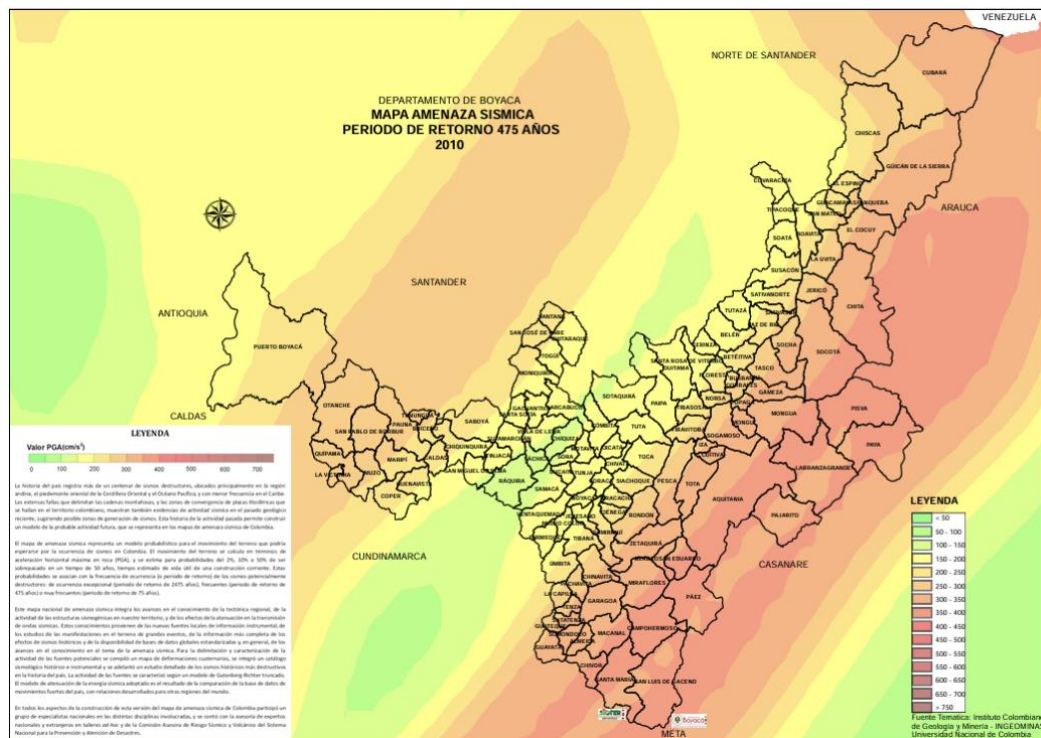


Fuente: IGAC, 2005

La evaluación de la amenaza sísmica basada en tipologías geotécnicas permite mejorar la compatibilidad entre el sistema de cimentación y la superestructura liviana, constituyendo un criterio clave para el diseño seguro de viviendas no convencionales en zonas rurales con alta variabilidad del suelo.

El Mapa de Amenaza Sísmica fue elaborado con la participación de especialistas nacionales e internacionales, coordinados por la Comisión Asesora de Riesgo Sísmico y Volcánico, mediante talleres y revisiones técnicas (SGC, 2015). Este mapa considera un periodo de retorno de 475 años, equivalente a una probabilidad del 10 % de superación en 50 años, y es ampliamente utilizado en el diseño estructural. La **Figura 5** constituye una herramienta fundamental para la planificación territorial y la evaluación del riesgo, al integrar información geológica, sismos tectónicos y registros históricos, apoyando la toma de decisiones y el cumplimiento de la normativa sísmica vigente.

Figura 5. Mapa amenaza sísmica periodo de retorno 475 años



Fuente: Planeación de Boyacá, 2010.

2.1.2 Marco geotécnico: comportamiento mecánico de los suelos

El comportamiento mecánico del suelo es un factor clave en el diseño y desempeño de cimentaciones, especialmente en edificaciones livianas, donde la interacción suelo–estructura tiene mayor influencia por la baja masa y rigidez de la superestructura. En el contexto rural de Boyacá, la diversidad litoestratigráfica y geomorfológica genera tipologías de suelo con respuestas mecánicas contrastantes frente a cargas, variaciones de humedad y sollicitaciones sísmicas.

Este capítulo analiza las principales tipologías geotécnicas del estudio —suelos finos cohesivos, suelos granulares, suelos orgánicos y rellenos blandos, depósitos coluviales de ladera y suelos residuales sobre roca—, clasificadas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), con el fin de describir su comportamiento mecánico típico y su influencia en el desempeño de las cimentaciones para viviendas no convencionales.

2.1.2.1 Transición de la clasificación (IGAC) al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Para el análisis del comportamiento mecánico de los suelos y su aplicación al diseño de cimentaciones, se adopta el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), que clasifica los materiales según granulometría, plasticidad y naturaleza de los finos, permitiendo relacionar el tipo de suelo con parámetros geotécnicos como capacidad portante, compresibilidad, permeabilidad y respuesta a cargas dinámicas (ASTM, 2020).

El SUCS agrupa los suelos en gravas (G), arenas (S), limos (M), arcillas (C) y suelos orgánicos (O), con subdivisiones según su plasticidad y contenido de finos, lo que facilita agrupar suelos con comportamientos mecánicos similares y formular criterios generales de diseño de cimentaciones en contextos con alta variabilidad geotécnica (Das, B. M, 2016).

En esta investigación, el SUCS permite establecer una correspondencia entre las tipologías de suelo predominantes en Boyacá y su respuesta mecánica típica, sin reemplazar los estudios

geotécnicos específicos requeridos en proyectos particulares. Este enfoque coincide con lo planteado por Terzaghi, Peck y Mesri, quienes destacan que la clasificación geotécnica es una herramienta clave para la evaluación preliminar del terreno y la selección inicial de soluciones de cimentación (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996).

2.1.2.1.1 Subdivisiones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) permite clasificar los suelos según su granulometría y propiedades de plasticidad de los finos, agrupándolos en suelos gruesos (gravas y arenas), suelos finos (limos y arcillas) y suelos orgánicos. Esta clasificación utiliza combinaciones de letras que describen el comportamiento geotécnico del material.

En el caso de los suelos gruesos, la clasificación depende de la proporción de grava, arena y finos, así como del grado de gradación del material. Las principales subdivisiones del sistema se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 2. *Subdivisiones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)*

Grupo de suelo	Símbolo SUCS	Descripción
Gravas	GW	Grava bien gradada
	GP	Grava mal gradada
	GM	Grava limosa
	GC	Grava arcillosa
Arenas	SW	Arena bien gradada
	SP	Arena mal gradada
	SM	Arena limosa
	SC	Arena arcillosa
Suelos finos	ML	Limo de baja plasticidad
	CL	Arcilla de baja plasticidad
	MH	Limo de alta plasticidad
	CH	Arcilla de alta plasticidad
Suelos orgánicos	OL	Suelo orgánico de baja plasticidad
	OH	Suelo orgánico de alta plasticidad
	PT	Turba

Fuente: Elaboración propia (Duque Escobar, Gonzalo: 2003)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) permite identificar el comportamiento geotécnico de los suelos a partir de su granulometría y plasticidad, facilitando la interpretación de sus propiedades mecánicas y su aplicación en el diseño de cimentaciones.

El tipo de suelo influye directamente en la selección del sistema de cimentación y en la necesidad de implementar soluciones técnicas adaptadas. Por ejemplo, las arcillas requieren análisis detallados debido a su expansividad y cambios volumétricos asociados a la humedad (Budi, G. S. , 2017). En Boyacá también se presentan suelos problemáticos, como expansivos, colapsables y orgánicos, donde el uso de materiales o soluciones de cimentación alternativas puede ayudar a mitigar sus efectos (IDEAM, 2019).

Diversos estudios recientes han demostrado la viabilidad de soluciones sostenibles de cimentación en viviendas rurales, especialmente en contextos donde el acceso a materiales tradicionales es limitado, logrando diseños seguros, técnicamente adecuados y con bajo impacto ambiental (SENCICO, 2023).

Asimismo, las características del suelo —como textura, estructura y composición— influyen en su comportamiento y uso. Existen suelos arenosos, arcillosos y franco-arenosos, determinados por la proporción de arena, limo y arcilla, mientras que otras clasificaciones científicas agrupan los suelos en órdenes como Mollisoles, Alfisoles, Oxisoles y Vertisoles, dependiendo de su formación y propiedades. Factores como clima, relieve y actividad humana también influyen en la productividad, erosión y sostenibilidad del suelo (Solano, A. J., 2000).

A continuación, en la **Tabla 3** se presenta la clasificación de los tipos de suelos presentes en Boyacá, organizada según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y su relación con la clasificación sísmo resistente establecida en la NSR-10:

Tabla 3. *Clasificación tipos de suelos en Boyacá*

Tipología de suelo	Clasificación SUCS probable	Tipo de suelo NSR-10	Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción ϕ (°)	Módulo de balasto k_s (MN/m ³)	Comportamiento geotécnico relevante
Suelos expansivos	CH	D – E	25 – 60	12 – 20	5 – 20	Arcillas de alta plasticidad sensibles a la humedad, con riesgo de hinchamiento y agrietamiento en cimentaciones
Suelos finos cohesivos	CL–ML	C – D	15 – 40	18 – 28	15 – 40	Arcillas y limos de compresibilidad moderada, susceptibles a asentamientos diferenciales
Suelos granulares	GW–GP–SW–SP	C – D	0 – 10	30 – 40	40 – 80	Arenas y gravas con buen drenaje, adecuadas para cimentaciones superficiales si tienen buena densidad
Arenas con finos	SM – SC	D – E	0 – 15	28 – 35	10 – 30	Arenas limosas o arcillosas con comportamiento intermedio; pueden perder resistencia al saturarse
Depósitos coluviales	GC–SC–SM	D – E	10 -50	20 - 32	15 - 50	Material heterogéneo de laderas andinas, con alta variabilidad y susceptibilidad a movimientos en masa
Suelos residuales	SM – SC	C	30 – 80	25 – 35	40 – 80	Suelos residuales por meteorización de lutitas, areniscas y arcillolitas, con estrato competente a mayor profundidad.

Fuente: Elaboración propia

NOTA: Los parámetros geotécnicos empleados corresponden a rangos típicos reportados en la literatura de mecánica de suelos y manuales de ingeniería geotécnica, utilizados cuando no se dispone de ensayos específicos del sitio. Estos valores se fundamentan en clasificaciones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y en correlaciones empíricas ampliamente utilizadas en el diseño de cimentaciones (Das, B. M., 2014); (Craig, R. F., 2004) (IGAC, 2005), así como en los lineamientos establecidos por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 para estudios geotécnicos (NSR-10, Título H, H.3.1).

2.1.2.2 Propiedades físico-mecánica de suelos típicos según tipologías geotécnicas

Las propiedades físico-mecánicas del suelo determinan su respuesta a las cargas de una edificación y la selección del sistema de cimentación. A continuación, se presentan las características mecánicas de cada tipología de suelo, enfocadas en su comportamiento estructural.

2.1.2.2.1 Suelos finos cohesivos

Los suelos finos cohesivos, clasificados en el SUCS como CL y CH, se caracterizan por su alto contenido de finos, baja permeabilidad, elevada compresibilidad y resistencia al corte

dependiente del contenido de agua y del estado de consolidación (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996).

Las arcillas de alta plasticidad (CH) son sensibles a cambios volumétricos por variaciones de humedad, generando expansión y contracción, lo que resulta crítico para viviendas livianas, ya que su baja carga puede no contrarrestar las presiones de levantamiento por hinchamiento (Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C., 2011). Además, estos suelos pueden presentar asentamientos diferidos por procesos de consolidación primaria y secundaria, afectando el desempeño de las cimentaciones a largo plazo.

2.1.2.2.2 Suelos granulares

Los suelos granulares (SP, SW, SM y GW) presentan un comportamiento mecánico dominado por la fricción interna entre partículas. Cuando están densos y con buena permeabilidad, ofrecen alta capacidad portante y baja compresibilidad, siendo favorables para cimentaciones superficiales ((Das, B. M, 2016)).

Sin embargo, en estado suelto o con presencia de finos, pueden presentar disminución de resistencia al corte y asentamientos por reordenamiento de partículas. Además, en condiciones de saturación pueden experimentar reducción temporal de rigidez, lo que debe considerarse en el diseño de cimentaciones, especialmente en viviendas livianas sensibles a deformaciones diferenciales (Kramer, S. L, 1996).

2.1.2.2.3 Suelos orgánicos y rellenos blandos

Los suelos orgánicos y rellenos blandos (OL y OH) presentan baja densidad, alta compresibilidad y muy baja capacidad portante, lo que genera asentamientos significativos a corto y largo plazo, incluso en edificaciones livianas (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2011).

Su comportamiento no lineal frente a cargas puede provocar deformaciones excesivas que afectan la estabilidad de la cimentación y la superestructura. Por ello, se recomienda evitar su uso como estrato de apoyo directo o aplicar técnicas de mejoramiento del terreno antes de construir (Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C., 2011).

2.1.2.2.4 Depósitos coluviales de ladera

Los depósitos coluviales de ladera son materiales de origen gravitacional con granulometría heterogénea, mala gradación y alta variabilidad lateral, formados por procesos de remoción en masa y acumulación de materiales. Por ello, presentan comportamiento mecánico complejo, con propiedades de resistencia y deformabilidad variables en distancias cortas (Terzaghi et al., 1996).

Su estabilidad depende de la pendiente y del contenido de agua, pudiendo generar asentamientos diferenciales y deformaciones localizadas bajo cargas estructurales. Esto representa un riesgo para cimentaciones superficiales en viviendas livianas si no se identifica adecuadamente la naturaleza y continuidad del material (Kramer, S. L, 1996).

2.1.2.2.5 Suelos residuales sobre roca

Los suelos residuales sobre roca se originan por la meteorización in situ del material rocoso, conservando parte de la estructura y mineralogía del macizo original. Su comportamiento mecánico depende del grado de alteración, espesor del perfil residual y profundidad de la roca competente (Das, B. M, 2016).

Cuando la roca sana está cercana a la superficie, pueden ofrecer condiciones favorables para cimentaciones, con mayor rigidez y menor susceptibilidad a asentamientos. Sin embargo, la transición suelo–roca puede generar contrastes de rigidez que afectan la distribución de esfuerzos,

por lo que debe considerarse en el diseño de cimentaciones, especialmente en estructuras livianas (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996).

2.1.2.3 Fenomenología de Suelos Especiales en Boyacá: Suelos derivados de cenizas volcánicas y depósitos coluviales.

En Boyacá también se identifican suelos especiales con comportamiento geotécnico particular, como los suelos derivados de cenizas volcánicas y los depósitos coluviales de ladera, que presentan respuestas complejas frente a cargas estructurales y variaciones de humedad.

Los suelos volcánicos se caracterizan por alta porosidad, baja densidad seca y elevada compresibilidad, con baja resistencia al corte en condiciones saturadas. Además, pueden presentar comportamiento colapsable, generando asentamientos súbitos al humedecerse bajo carga, lo que representa un riesgo para cimentaciones superficiales en viviendas livianas (de Silva, G. P., & Vardon, P. J., 2010).

Por su parte, los depósitos coluviales de ladera son materiales heterométricos y mal gradados, con alta variabilidad lateral y cambios abruptos de rigidez y resistencia, lo que favorece asentamientos diferenciales y deformaciones localizadas bajo cargas estructurales (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996).

En ambos casos, estos suelos especiales requieren un enfoque de diseño conservador, basado en el reconocimiento detallado del perfil del terreno y en la compatibilidad entre el sistema de cimentación y el comportamiento mecánico del suelo, especialmente en edificaciones livianas sensibles a deformaciones diferenciales.

2.1.2.4 Criterios de profundidad de desplante en función de la tipología de suelo en el contexto rural de Boyacá

La profundidad de desplante (Df) es un parámetro clave en el diseño de cimentaciones, ya que influye en la capacidad portante y estabilidad del sistema frente a variaciones volumétricas, meteorización y cambios estacionales de humedad. En Boyacá, donde predominan suelos finos cohesivos, depósitos coluviales y perfiles residuales, su definición debe considerar la zona activa de variación volumétrica asociada a ciclos de secado–humedecimiento (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996) (Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C., 2011).

En suelos expansivos (CL y CH según SUCS), la cimentación debe ubicarse por debajo de la zona activa, donde ocurren expansión y contracción por cambios de humedad, para reducir levantamientos diferenciales (Das, B. M, 2016) (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2011).

En el contexto rural de Boyacá, los ciclos de humedad y precipitación bimodal afectan especialmente a viviendas livianas (guadua, wood frame, steel frame), cuya baja masa estructural las hace más sensibles a deformaciones diferenciales (AIS, 2010).

En suelos orgánicos, rellenos blandos y depósitos coluviales, la profundidad de desplante debe definirse buscando un estrato competente, como material granular denso o roca meteorizada, y considerando mecanismos de transferencia de carga y posibles soluciones profundas cuando sea necesario (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996) (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2011).

En conclusión, la profundidad de desplante debe definirse según la tipología geotécnica, el espesor de la zona activa, la morfología del terreno y el sistema estructural, en concordancia con los lineamientos del Título H de la NSR-10 (AIS, 2010), (NSR-10,Título H, H.4.2).

2.1.3 Viviendas no convencionales y sistemas estructurales

Las viviendas no convencionales, construidas con sistemas livianos como Steel Frame, Wood Frame y Guadua, presentan un comportamiento estructural diferente al de edificaciones tradicionales, debido a su bajo peso propio, menor rigidez y reducida masa sísmica. Estas características influyen en la interacción suelo–estructura, aumentando la sensibilidad frente a asentamientos diferenciales, levantamientos por expansión del suelo y pérdida de soporte.

En zonas rurales de Boyacá, donde predominan suelos expansivos, depósitos coluviales y materiales heterogéneos, la compatibilidad entre el sistema estructural y la cimentación se convierte en un criterio técnico fundamental para garantizar la estabilidad y durabilidad de las edificaciones.

2.1.3.1 Tipologías estructurales livianas

- **Steel Frame (Light Gauge Steel)**

El sistema Steel Frame utiliza perfiles delgados de acero galvanizado conformados en frío, ensamblados con tornillería estructural, destacándose por su alta relación resistencia–peso y buen desempeño sísmico. Desde el punto de vista geotécnico, estas estructuras generan bajas presiones de contacto, lo que permite el uso de cimentaciones superficiales como zapatas aisladas, vigas de amarre o plateas delgadas, siempre que el suelo tenga capacidad portante suficiente (AIS, 2010) (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2013).

- **Wood Frame (Entramado en madera)**

El sistema Wood Frame utiliza elementos estructurales de madera organizados en entramados verticales y horizontales, con comportamiento flexible y buen desempeño sísmico cuando se garantiza un adecuado diseño de conexiones y control de humedad. En zonas rurales es compatible con cimentaciones superficiales, aunque requiere protección contra humedad

ascendente, especialmente en suelos arcillosos expansivos del Altiplano Cundiboyacense (IGAC, 2014).

- **Guadua**

La guadua es un material representativo en sistemas constructivos no convencionales en Colombia, con alta resistencia a tracción y flexión y buena disipación de energía sísmica. Según la normativa colombiana (AIS, 2010), su diseño debe incluir protección contra humedad y agentes biológicos, además de una adecuada conexión con la cimentación para evitar levantamientos o deterioro por capilaridad.

- **Sistemas adicionales livianos**

También pueden considerarse otras tipologías estructurales livianas aplicables en zonas rurales:

- Panelería liviana estructural (SIP – Structural Insulated Panels)
- Sistema tipo bahareque encementado
- Madera laminada (GLULAM)
- Sistemas mixtos (guadua–concreto, madera–acero)

Estos sistemas comparten como característica principal la reducción de cargas verticales, lo cual modifica la interacción suelo–estructura frente a asentamientos y fuerzas de succión por viento.

2.1.3.2 Análisis de cargar y transmisión de esfuerzos al suelo

El comportamiento estructural de las viviendas livianas depende de la correcta evaluación de las cargas actuantes y su transmisión hacia el terreno a través del sistema de cimentación.

De acuerdo con la **Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica** (AIS, 2010), las cargas que deben considerarse son:

- Cargas muertas (peso propio estructural y no estructural).
- Cargas vivas (ocupación y uso).
- Cargas sísmicas (según zonificación sísmica nacional).
- Cargas de viento.

En estructuras livianas, las cargas verticales son reducidas; sin embargo, las cargas laterales adquieren mayor relevancia relativa. La transmisión de esfuerzos al suelo depende de:

- Área efectiva de cimentación.
- Módulo de reacción del suelo.
- Capacidad portante admisible.
- Control de asentamientos totales y diferenciales.

Según (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996), el diseño debe verificar que:

$$q_{aplicada} \leq q_{adm}$$

El cual $q_{aplicada}$ es la presión real que la edificación transmite al suelo a través de la cimentación. Se calcula como:

$$q_{aplicada} = \frac{p}{A}$$

Donde:

- **P** = carga total transmitida (kN)
- **A** = área de la cimentación (m²)

Es decir, cuánto peso por metro cuadrado está soportando el terreno.

En viviendas livianas (guadua, wood frame, steel frame), esta presión suele ser baja porque el peso propio estructural es reducido.

Por otro lado, q_{adm} es la capacidad portante admisible del suelo, es decir la presión máxima que el terreno puede soportar sin fallar ni producir asentamientos excesivos. Este se obtiene a partir

de ensayos geotécnicos (SPT, laboratorios), cálculos teóricos (Terzaghi, Meyerhof) y aplicaciones de factores de seguridad

$$q_{adm} = \frac{q_{ult}}{FS}$$

Donde:

- q_{ult} = capacidad portante última
- FS = factor de seguridad (usualmente entre 2 y 3)

En el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales, uno de los criterios fundamentales de verificación corresponde al control de la presión transmitida al terreno. Este principio se expresa mediante la relación $q_{aplicada} \leq q_{adm}$, la cual establece que la presión generada por las cargas estructurales sobre el área de apoyo no debe superar la capacidad portante admisible del suelo (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996).

La presión aplicada ($q_{aplicada}$) se determina como el cociente entre la carga total transmitida por la estructura y el área efectiva de la cimentación, representando la intensidad de esfuerzos que el terreno debe resistir en condiciones de servicio (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2013). Por su parte, la capacidad portante admisible (q_{adm}) corresponde al esfuerzo máximo que el suelo puede soportar sin presentar falla por cortante ni asentamientos incompatibles con el desempeño estructural, incorporando un factor de seguridad respecto a la capacidad última del material (Das, B. M, 2016).

El cumplimiento de esta condición garantiza que la cimentación opere en un rango seguro, evitando fallas del terreno y deformaciones excesivas. En viviendas no convencionales y sistemas livianos, aunque las cargas verticales son menores, la verificación de la capacidad portante sigue siendo obligatoria según los lineamientos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010).

2.1.3.3 El problema del levantamiento (Up-lift) y asentamientos diferenciales en estructuras de baja densidad.

Las estructuras livianas presentan una condición particular: su bajo peso propio puede hacerlas vulnerables a fenómenos de levantamiento (up-lift), especialmente bajo acción de viento o en suelos expansivos.

- **Levantamiento por viento**

En zonas rurales abiertas, las cargas de succión pueden superar el peso propio de la cubierta y parte de la estructura. Si la cimentación no está adecuadamente anclada, pueden producirse:

- Separación estructura–cimiento.
- Fisuración en elementos de conexión.
- Fallas progresivas en cubierta.

La NSR-10 exige verificar la estabilidad frente a fuerzas de tracción generadas por viento y sismo, garantizando anclajes adecuados entre superestructura y cimentación (AIS, 2010).

- **Asentamientos diferenciales**

Aunque las cargas verticales son menores, los suelos heterogéneos o compresibles pueden generar deformaciones diferenciales significativas. En viviendas livianas, estos asentamientos pueden provocar:

- Desalineación de marcos estructurales.
- Fisuras en panelería liviana.
- Pérdida de verticalidad en columnas de guadua o madera.

De acuerdo con (Das, B. M, 2016), los asentamientos diferenciales admisibles dependen del sistema estructural, siendo más críticos en estructuras flexibles con uniones mecánicas.

En suelos expansivos del Altiplano Cundiboyacense, las variaciones de humedad estacional pueden generar levantamientos diferenciales del terreno, afectando especialmente estructuras de baja carga permanente.

2.1.4 Desarrollo metodológico: modelación e interacción suelo– estructura

2.1.4.1 Esquema conceptual simplificado de interacción suelo–estructura

Para representar de forma conceptual el fenómeno de interacción suelo–estructura en edificaciones livianas, puede utilizarse un modelo simplificado basado en el **modelo de reacción del terreno tipo Winkler**, en el cual el suelo se representa como un conjunto de resortes independientes que reaccionan proporcionalmente al desplazamiento vertical de la cimentación (Das, B. M, 2016).

En este modelo, la relación entre la presión transmitida al terreno y el asentamiento del suelo puede expresarse como:

$$q = k_s \cdot s$$

Donde:

- **q** = presión de contacto suelo–cimentación (kPa)
- **k_s** = módulo de reacción del suelo o módulo de balasto (kN/m³)
- **s** = asentamiento vertical del terreno (m)

Este modelo permite representar de manera conceptual la interacción entre el sistema estructural y el terreno, ya que la deformación del suelo depende tanto de la rigidez del terreno como de la carga transmitida por la estructura.

Para una cimentación superficial sometida a una carga **P** distribuida en un área **A**, la presión transmitida al suelo se define como:

$$q = \frac{p}{A}$$

Sustituyendo en la relación anterior:

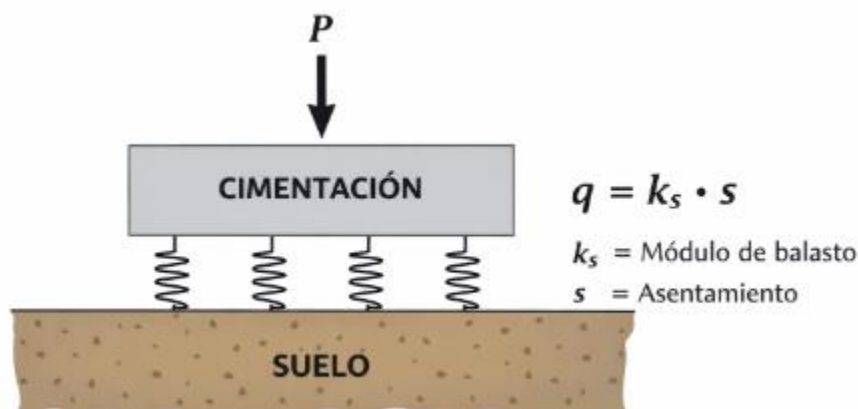
$$s = \frac{p}{A \cdot k_s}$$

Esta expresión permite estimar de manera simplificada el asentamiento del sistema suelo–cimentación, mostrando cómo la respuesta del terreno depende simultáneamente de:

- la carga estructural
- el área de apoyo de la cimentación
- la rigidez del suelo

En viviendas no convencionales con sistemas estructurales livianos (guadua, wood frame o steel frame), las cargas P son relativamente bajas; sin embargo, cuando el módulo de reacción del suelo k_s es reducido como ocurre en suelos finos cohesivos, orgánicos o coluviales pueden presentarse deformaciones diferenciales que afectan el comportamiento estructural (**ver figura 6**). Por esta razón, el estudio utiliza un análisis conceptual de interacción suelo–estructura, que permite interpretar el desempeño relativo de diferentes sistemas de cimentación según la tipología geotécnica del suelo (Das, B. M, 2016).

Figura 6. Modelo conceptual de interacción suelo-estructura mediante reacción del terreno tipo Winkler.



Fuente: Elaboración propia

2.1.4.2 Perfiles estratigráficos tipo (modelos de diseño)

Los perfiles estratigráficos tipo son modelos conceptuales que representan la secuencia de materiales, su espesor y la profundidad del estrato competente. No sustituyen los estudios geotécnicos específicos, sino que se utilizan para evaluaciones preliminares y comparativas del comportamiento geotécnico, según criterios aceptados en ingeniería geotécnica (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2011) (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996).

2.1.4.3 Determinación de Parámetros Geotécnicos de Entrada

Los parámetros geotécnicos de entrada utilizados en la modelación incluyen cohesión efectiva (c'), ángulo de fricción interna (ϕ') y módulo de deformación del suelo (E_s), definidos para cada perfil estratigráfico tipo a partir de rangos típicos de la literatura técnica y estudios regionales. Estos valores se seleccionaron de forma conservadora, considerando el comportamiento mecánico de cada suelo según su clasificación SUCS.

La determinación de estos parámetros se basa en principios de la mecánica de suelos y correlaciones empíricas para análisis preliminares, sin sustituir ensayos de laboratorio o pruebas in situ (Das, B. M, 2016) (Bowles, J. E., 1996). Asimismo, se consideró la influencia del nivel freático y la presión de poros sobre los esfuerzos efectivos, debido a su efecto en la resistencia al corte y la deformabilidad del suelo (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996).

2.1.4.4 Metodología de modelación estructural (análisis de interacción suelo–estructura)

El análisis de la interacción suelo–estructura se realizó mediante modelos estructurales simplificados, representando la cimentación y la superestructura liviana como un sistema acoplado. El suelo se idealizó como un medio deformable con apoyos elásticos, utilizando coeficientes de balasto equivalentes para cada perfil estratigráfico tipo.

Este enfoque permitió evaluar el comportamiento de distintas cimentaciones frente a deformaciones del terreno, asentamientos diferenciales y levantamientos por cambios volumétricos en suelos finos, sin recurrir a modelos numéricos avanzados. La metodología es consistente con análisis preliminares de interacción suelo–estructura en edificaciones livianas (Poulos, H. G., & Davis, E. H., 1974) (Bowles, J. E., 1996).

2.1.4.5 Criterios de selección de cimentaciones: matriz de decisión geotécnica

Con base en los perfiles estratigráficos tipo, los parámetros geotécnicos adoptados y los resultados del análisis de interacción suelo–estructura, se estructuró una matriz de decisión geotécnica que relaciona el tipo de suelo según SUCS, la pendiente del terreno y el sistema constructivo no convencional con tipologías de cimentación recomendadas.

La matriz constituye un instrumento de síntesis metodológica que permite traducir información secundaria y criterios normativos en recomendaciones técnicas aplicables, orientadas a minimizar riesgos asociados a asentamientos diferenciales, levantamientos por subpresión y pérdida de estabilidad en viviendas livianas. Este enfoque es coherente con prácticas de selección preliminar de cimentaciones basadas en el comportamiento del suelo y en la compatibilidad suelo–estructura (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A., 2013) (Das, B. M., 2016).

2.1.5 Análisis técnico y propuesta de diseño

2.1.5.1 Cimentaciones superficiales: placas flotantes rígidas vs. vigas de cimentación

En suelos expansivos o con alta variabilidad volumétrica, las placas flotantes rígidas presentan mejor desempeño que zapatas aisladas o vigas de cimentación, debido a su mayor rigidez y capacidad para redistribuir deformaciones diferenciales. Esta solución es adecuada para viviendas livianas, donde el hinchamiento del suelo puede superar las cargas transmitidas (Nelson, J. D., & Miller, D. J., 1992) (Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C., 2011).

Cuando se utilizan vigas de cimentación, estas deben conectarse mediante sistemas de amarre sobredimensionados para mejorar la continuidad estructural y reducir deformaciones incompatibles con la superestructura liviana (Bowles, J. E., 1996).

2.1.5.2 Cimentaciones profundas artesanales: micropilotes y hincado de elementos

En suelos blandos, orgánicos o altamente compresibles, donde la capacidad portante y los asentamientos resultan críticos, se consideró el uso de cimentaciones profundas artesanales, tales como micropilotes o elementos hincados, orientados a transferir cargas a estratos más competentes. Estas soluciones permiten reducir asentamientos y mejorar la estabilidad del sistema estructural, siempre que se adopten criterios adecuados de ejecución y control constructivo (FHWA, 2005) (Poulos, H. G., & Davis, E. H., 1974).

2.1.5.3 Sistemas de anclaje especiales para mitigación de viento y subpresión

Dado el bajo peso propio de las viviendas no convencionales, se incorporó el análisis de sistemas de anclaje especiales destinados a mitigar efectos de subpresión por hinchamiento del suelo y acciones de viento. Estos sistemas permiten garantizar la continuidad entre la cimentación y la superestructura, mejorando el desempeño global del sistema frente a acciones verticales y horizontales no deseadas (Nelson, J. D., & Miller, D. J., 1992).

2.1.5.4 Detalles constructivos típicos (planos de referencia)

Como resultado del análisis técnico, se definieron detalles constructivos típicos a nivel de planos de referencia, orientados a ilustrar la correcta disposición de placas rígidas, vigas de amarre, anclajes y elementos de conexión con la superestructura liviana. Estos detalles no constituyen planos ejecutivos, sino esquemas de apoyo técnico.

2.2 Marco conceptual

Esta sección define los términos técnicos clave utilizados en el estudio sobre sistemas de cimentación para viviendas no convencionales en zonas rurales de Boyacá, con el fin de unificar criterios y facilitar la comprensión del contenido técnico.

La cimentación se entiende como el elemento estructural encargado de transmitir las cargas de la edificación al suelo, garantizando que no se exceda la capacidad portante ni se generen asentamientos perjudiciales, aspectos que dependen de las propiedades geotécnicas del suelo como composición, compactación, humedad y nivel freático (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2013) (Das, B. M, 2016).

La *capacidad portante* define la carga máxima que el terreno puede soportar de forma segura, mientras que los asentamientos y asentamientos diferenciales corresponden a deformaciones del suelo que pueden afectar el desempeño estructural, especialmente en suelos arcillosos, coluviales o heterogéneos presentes en Boyacá (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996).

El análisis geotécnico se fundamenta en la teoría de esfuerzos efectivos, según la cual la resistencia al corte y deformabilidad del suelo dependen del esfuerzo efectivo (diferencia entre esfuerzo total y presión de poros). Incrementos en el nivel freático reducen la resistencia del suelo, situación común en zonas como el Valle de Sugamuxi, donde las fluctuaciones estacionales del agua subterránea afectan la capacidad portante y pueden generar deformaciones en cimentaciones superficiales (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2013) (Das, B. M, 2016).

Las *viviendas no convencionales* corresponden a edificaciones construidas con sistemas livianos como guadua, madera o steel frame, frecuentemente desarrolladas mediante

autoconstrucción en áreas rurales, lo que exige soluciones de cimentación técnicas, económicas y adaptadas al contexto local (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2023).

Finalmente, el estudio incorpora criterios de amenaza sísmica y diseño sismo resistente según la NSR-10, así como principios de estabilidad del terreno, drenaje y sostenibilidad constructiva, con el objetivo de proponer soluciones de cimentación seguras y compatibles con el entorno rural (AIS, 2010), (SENCICO, 2023).

2.3 Marco legal

El marco legal de la investigación está conformado por normas, reglamentos y lineamientos técnicos que regulan el diseño, construcción y evaluación de edificaciones en Colombia, especialmente en relación con la amenaza sísmica, el comportamiento del suelo y los sistemas de cimentación. Estas disposiciones proporcionan el soporte técnico y jurídico para el análisis y respaldan las recomendaciones de cimentación para viviendas no convencionales en zonas rurales de Boyacá.

2.3.1 Cumplimiento de la NSR-10

Las tipologías de cimentación y criterios propuestos fueron evaluados conforme a la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10, considerando los Títulos A (Generalidades), E (Casas de uno y dos pisos), G (Estructuras de madera) y H (Estudios geotécnicos y cimentaciones). Se verificó la coherencia entre la clasificación de suelos, la zonificación sísmica y los requisitos de anclaje y continuidad estructural establecidos por la norma (AIS, 2010).

2.3.2 Guía de recomendaciones para la autoconstrucción técnica

Finalmente, se estructuró una guía de recomendaciones orientada a la autoconstrucción técnica de viviendas no convencionales, en la cual se enfatiza el cumplimiento de los Títulos E y G de la NSR-10 para validar la correcta conexión entre la cimentación y la superestructura liviana.

Esta guía prioriza criterios de seguridad estructural y compatibilidad suelo–estructura, sin sustituir la responsabilidad profesional ni los estudios específicos exigidos por la normativa vigente (AIS, 2010).

3. Método

La investigación se desarrolla con un enfoque técnico–aplicado descriptivo–analítico, orientado a definir criterios para la selección de sistemas de cimentación en viviendas no convencionales, a partir de la caracterización de tipologías geotécnicas representativas de Boyacá.

El diseño metodológico se organiza en cuatro fases integradas: análisis geológico–geomorfológico, clasificación geotécnica mediante SUCS, evaluación normativa según la NSR-10 y análisis conceptual de la interacción suelo–estructura para comparar sistemas de cimentación.

3.1 Fase I: Caracterización geológica y delimitación de tipologías geotécnicas

3.1.1 Recolección y análisis de información secundaria

En esta fase se realiza la recopilación y análisis de información secundaria proveniente del Servicio Geológico Colombiano, cartografía geológica y geomorfológica departamental, estudios técnicos, tesis y publicaciones científicas relacionadas con la geotecnia regional. El propósito es identificar las unidades litoestratigráficas predominantes, las unidades geomorfológicas representativas y las condiciones generales de amenaza sísmica que influyen en el comportamiento del subsuelo.

3.1.2 Agrupación en tipologías geotécnicas representativas y clasificación geotécnica mediante SUCS

Debido a la heterogeneidad territorial de Boyacá, el análisis no se realiza por municipios, sino mediante la agrupación de suelos con comportamientos mecánicos similares en tipologías geotécnicas representativas. Se identifican suelos finos cohesivos, suelos granulares, suelos

orgánicos y rellenos blandos, depósitos coluviales de ladera y suelos residuales sobre roca, los cuales se clasifican según el SUCS para determinar su comportamiento geotécnico, capacidad portante preliminar y susceptibilidad a asentamientos diferenciales, cambios volumétricos y pérdida de resistencia al corte.

3.2 Fase II: Evaluación normativa y parámetros de sitio (NSR-10)

En esta etapa se realiza la revisión del Título H de la NSR-10, enfocada en clasificación de suelos, parámetros de sitio, amenaza sísmica y criterios de diseño de cimentaciones. Este análisis se integra con las tipologías geotécnicas identificadas, relacionando tipo de suelo, categoría de sitio y requisitos mínimos de seguridad estructural, con el fin de verificar que las soluciones de cimentación propuestas sean coherentes con la normativa vigente y las condiciones sísmicas de Boyacá.

3.3 Fase III. Análisis técnico de sistemas de cimentación

3.3.1 Identificación de alternativas de cimentación

En esta fase se identifican y analizan alternativas de cimentación para viviendas no convencionales en zonas rurales, como zapatas aisladas y corridas reforzadas, plataformas granulares con vigas de amarre, parrillas estructurales elevadas, cimentaciones escalonadas, micropilotes, pilotes helicoidales y sistemas combinados. Estas opciones se evalúan según su compatibilidad con las tipologías geotécnicas identificadas.

3.4 Fase IV. Evaluación constructiva

En esta fase se evalúa la viabilidad constructiva de las alternativas de cimentación para zonas rurales de Boyacá, considerando aspectos como complejidad constructiva, necesidad de maquinaria, intervención del terreno, adaptabilidad a topografías irregulares y compatibilidad con autoconstrucción supervisada.

El análisis prioriza soluciones adaptables a condiciones geomorfológicas como laderas, suelos heterogéneos y niveles freáticos someros, favoreciendo sistemas que reduzcan excavaciones profundas, minimicen cortes y rellenos en pendientes y faciliten el control del drenaje. También se valoran sistemas elevados o modulares que separen la estructura del terreno, especialmente en suelos expansivos, coluviales o compresibles.

Finalmente, se seleccionan las alternativas de cimentación con mayor equilibrio entre desempeño geotécnico y facilidad constructiva, garantizando soluciones viables y compatibles con sistemas estructurales livianos en el contexto rural.

4. Resultados

Los resultados del análisis indican que el desempeño estructural de las cimentaciones en viviendas no convencionales en zonas rurales de Boyacá depende principalmente de la compatibilidad deformacional entre el suelo y la superestructura liviana, más que de la sola verificación de la capacidad portante admisible. Aunque las presiones transmitidas por estructuras livianas suelen ser bajas, fenómenos como expansión, compresibilidad diferencial, heterogeneidad lateral y subpresión pueden generar distorsiones estructurales incompatibles con sistemas de baja rigidez.

Estos resultados permitieron relacionar las propiedades geotécnicas del suelo con la selección de sistemas de cimentación técnicamente viables, considerando condiciones del entorno rural como disponibilidad de materiales, requisitos constructivos y limitaciones económicas. Así, se establece una base técnica de referencia para el diseño de cimentaciones en viviendas no convencionales, sin constituir una guía normativa.

En consecuencia, el criterio principal para seleccionar la cimentación fue el control de deformaciones diferenciales y la continuidad estructural del sistema de apoyo, además del cumplimiento de la relación entre presión aplicada y capacidad portante del suelo.

Comportamiento en suelos finos cohesivos (CL)

En los suelos finos cohesivos identificados en las zonas rurales analizadas predominan materiales clasificados como CL (arcillas de baja plasticidad) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Estos suelos se caracterizan por presentar una permeabilidad baja, comportamiento cohesivo y una compresibilidad moderada, lo que puede generar deformaciones del terreno bajo la acción de cargas estructurales. Aunque las variaciones volumétricas no son tan pronunciadas como en arcillas de alta plasticidad (CH), estos materiales pueden experimentar asentamientos diferenciales asociados a cambios en el contenido de agua, especialmente en contextos donde existen ciclos de secado y humedecimientos característicos de las condiciones climáticas del departamento de Boyacá.

Perfil estratigráfico

Clasificación SUCS predominante: CL – ML / CL

En sectores del altiplano de Boyacá predominan suelos finos cohesivos, con arcillas de baja plasticidad (CL) en los estratos superficiales, originadas por la meteorización de lutitas y arcillolitas. Estos suelos presentan baja permeabilidad y comportamiento cohesivo, lo que influye en el desempeño de cimentaciones superficiales. Desde el punto de vista geotécnico, requieren considerar asentamientos diferenciales y variaciones mecánicas por cambios de humedad, especialmente en viviendas livianas sensibles a la interacción suelo–estructura.

Estratigrafía tipo (**ver figura 7**):

- Estrato 1: 0.00–0.30 m – Capa vegetal / suelo orgánico (no estructural)

- Estrato 2: 0.30–2.00 m – Limo arcilloso / arcilla limosa (CL–ML / CL)
- Estrato 3: 2.00–5.00 m – Arcilla más rígida o suelo mixto (CL rígido / SC–SM)
- Estrato 4: >5.00 m – roca meteorizada (estrato competente)

Nivel freático tipo: Variable, profundidad media; ascenso en temporada de lluvias.

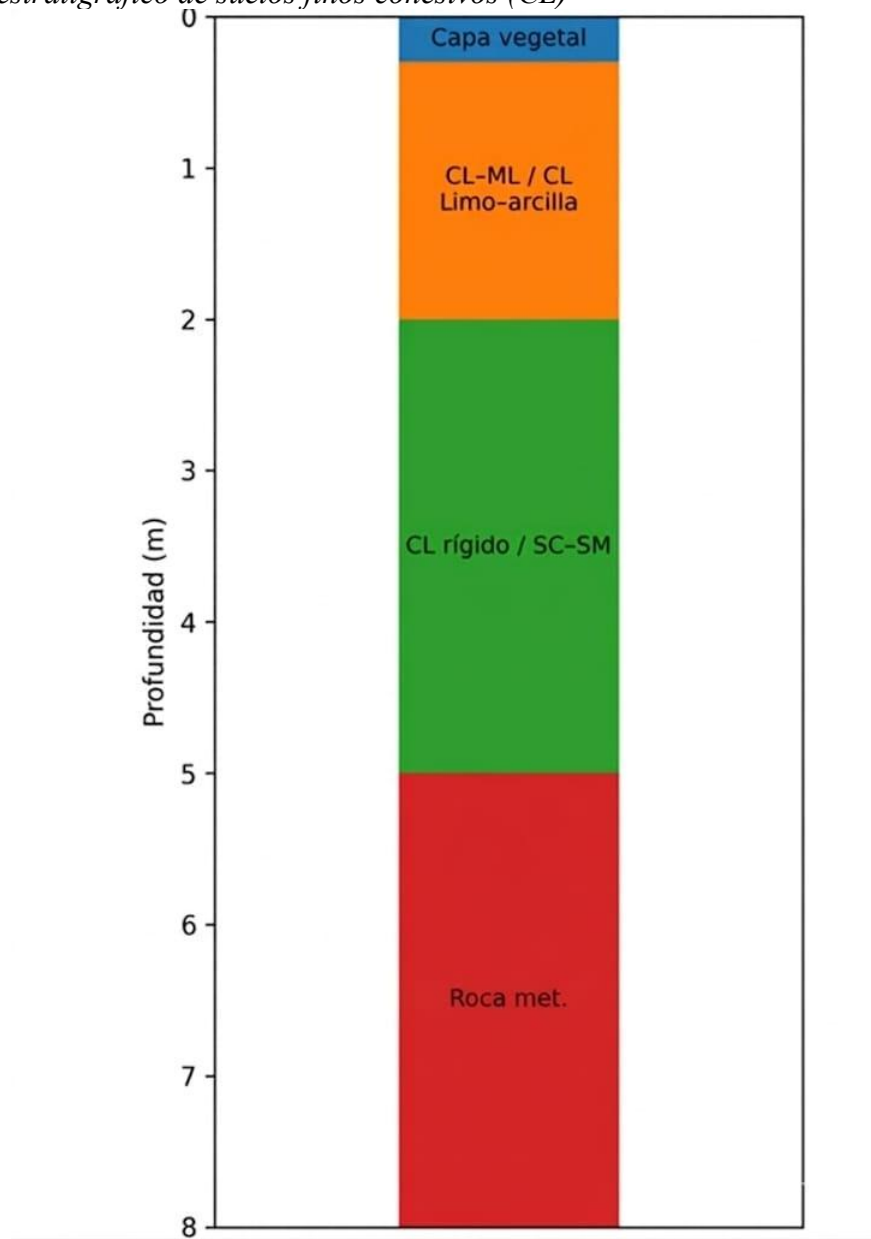
Parámetros geotécnicos de entrada (rangos típicos):

- Cohesión, c : 15 – 40 kPa
- Ángulo de fricción, ϕ : 18 – 28°
- Módulo de deformación, E_s : 10 – 30 MPa
- Módulo de balasto, k_s : 15 – 40 MN/m³

Tipologías de cimentación asociadas:

- Zapata corrida con vigas de amarre
- Losa rígida en presencia de cargas livianas
- Dados escalonados en pendientes moderadas

Referencia base: (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996) (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2013) (Das, B. M, 2016).

Figura 7. Perfil estratigráfico de suelos finos cohesivos (CL)

Fuente: Elaboración propia

Comportamiento en suelos granulares

En suelos granulares densos y con adecuada permeabilidad natural, el desempeño de zapatas aisladas conectadas mediante vigas de amarre resultó satisfactorio, siempre que se garantice una adecuada compactación del terreno y control del drenaje superficial.

No obstante, en condiciones de saturación o baja densidad relativa, se identificó la posibilidad de asentamientos por acomodación de partículas, lo que puede generar

deformaciones diferenciales moderadas. En estos casos, el incremento del área efectiva de apoyo o el uso de sistemas continuos mejora la estabilidad.

Perfil estratigráfico

Clasificación SUCS predominante: SW – SP – GW – GP / SM – SC (suelos residuales derivados de meteorización)

Descripción general: Suelos donde el comportamiento está dominado por densidad, compactación y drenaje. Generalmente favorables para cimentación superficial.

Estratigrafía tipo (**ver figura 8**):

- Estrato 1: 0.00–0.30 m – Capa vegetal
- Estrato 2: 0.30–2.50 m – Arena/grava (SW–SP / GW–GP / SM–SC)
- Estrato 3: 2.50–6.00 m – Saprolito o residual más rígido
- Estrato 4: >6.00 m – Roca meteorizada o sana

Nivel freático tipo: Profundo o no influyente; riesgo puntual de socavación.

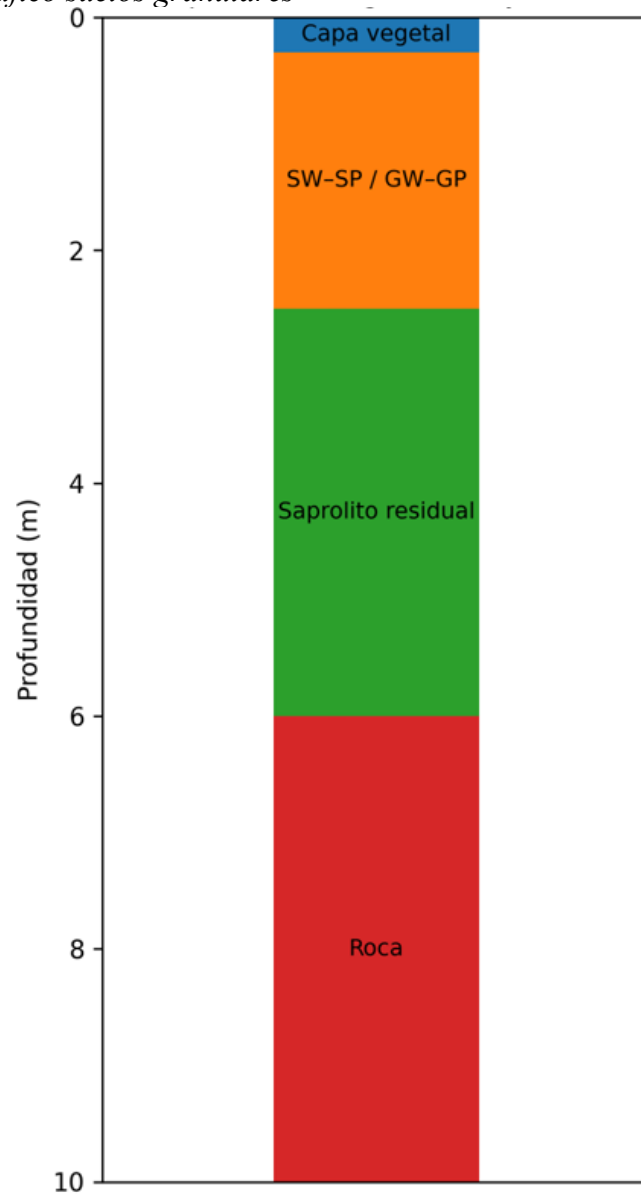
Parámetros geotécnicos de entrada (rangos típicos):

- Cohesión efectiva, c' : 0 kPa
- Ángulo de fricción, ϕ : 28 – 35°
- Módulo de deformación, E_s : 30 – 80 MPa
- Módulo de balasto, k_s : 40 – 80 MN/m³

Tipologías de cimentación asociadas:

- Zapatas aisladas con vigas de amarre
- Zapatas corridas Cimentaciones escalonadas en ladera

Referencia base: (Das, B. M, 2016) (Bowles, J. E., 1996) (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2013).

Figura 8. *Perfil estratigráfico suelos granulares*

Fuente: Elaboración propia

Comportamiento en suelos orgánicos y rellenos blandos

En suelos altamente compresibles, los modelos mostraron asentamientos significativos incluso con cargas reducidas. Las cimentaciones superficiales convencionales presentan alto riesgo de deformación progresiva, afectando la verticalidad y continuidad estructural. En cambio, el uso de micropilotes o elementos hincados permite transferir las cargas a estratos más competentes,

reduciendo asentamientos totales y diferenciales, aunque su eficacia depende del control constructivo y la verificación del estrato competente.

Perfil estratigráfico

Clasificación SUCS predominante: OH – PT / CL blanda / ML saturado

Descripción general: Suelos de muy baja resistencia y alta compresibilidad, con deformaciones diferidas significativas. No aptos para cimentación superficial directa sin intervención.

Estratigrafía tipo (**ver figura 9**):

- Estrato 1: 0.00–0.50 m – Suelo orgánico superficial (OH)
- Estrato 2: 0.50–3.00 m – Turba / arcilla blanda (OH–PT / CL blanda)
- Estrato 3: 3.00–8.00 m – Limo o arena con finos (ML–SM)
- Estrato 4: >8.00 m – Arena/grava densa o roca meteorizada

Nivel freático tipo: Alto o saturación frecuente.

Parámetros geotécnicos de entrada (rangos típicos):

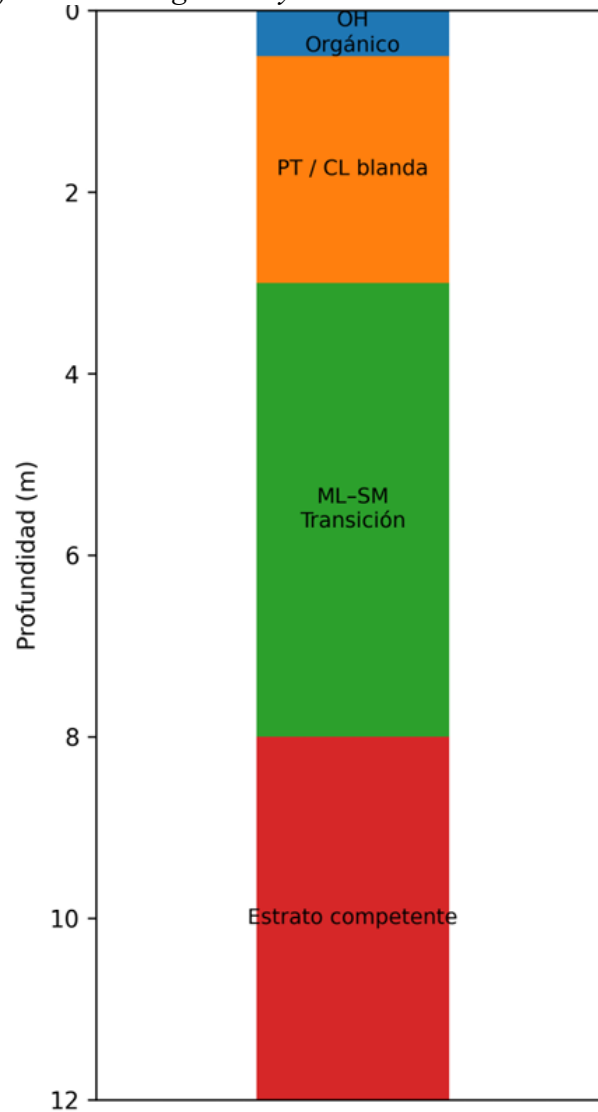
- Cohesión, c : 0 – 15 kPa
- Ángulo de fricción, ϕ : 15 – 25°
- Módulo de deformación, E_s : 2 – 10 MPa
- Módulo de balasto, k_s : 5 – 15 MN/m³

Tipologías de cimentación asociadas:

- Mejoramiento del suelo + losa rígida
- Micropilotes o pilotes artesanales
- Transferencia de carga a estrato competente

Referencia base: (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G, 1996) (Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A, 2013) (Poulos, H. G., & Davis, E. H., 1974).

Figura 9. *Perfil estratigráfico suelos orgánicos y rellenos blandos*



Fuente: Elaboración propia

Comportamiento en depósitos coluviales de ladera

En perfiles heterogéneos asociados a ladera, se identificó una variabilidad lateral significativa de rigidez. Las zapatas aisladas mostraron alta susceptibilidad a asentamientos diferenciales, especialmente cuando la transición entre materiales ocurre en distancias cortas.

Las placas rígidas continuas presentaron mejor desempeño frente a dicha variabilidad, al redistribuir esfuerzos en el plano de apoyo. Sin embargo, en pendientes pronunciadas, el control del drenaje superficial y la verificación de estabilidad global del talud resultan tan importantes como la selección del sistema de cimentación.

Perfil estratigráfico

Clasificación SUCS predominante: SC – GC – CL variable

Descripción general: Depósitos heterogéneos con alta variabilidad lateral y vertical, frecuentes en laderas. El diseño está controlado por estabilidad y drenaje.

Estratigrafía tipo (**ver figura 10**):

- Estrato 1: 0.00–0.40 m – Coluvión superficial suelto
- Estrato 2: 0.40–3.50 m – Coluvión heterogéneo (GC–SC con matriz fina)
- Estrato 3: 3.50–8.00 m – Coluvión denso / residual
- Estrato 4: >8.00 m – Roca meteorizada

Nivel freático tipo: Altamente sensible a infiltración; presión de poros en lluvias.

Parámetros geotécnicos de entrada (rangos típicos):

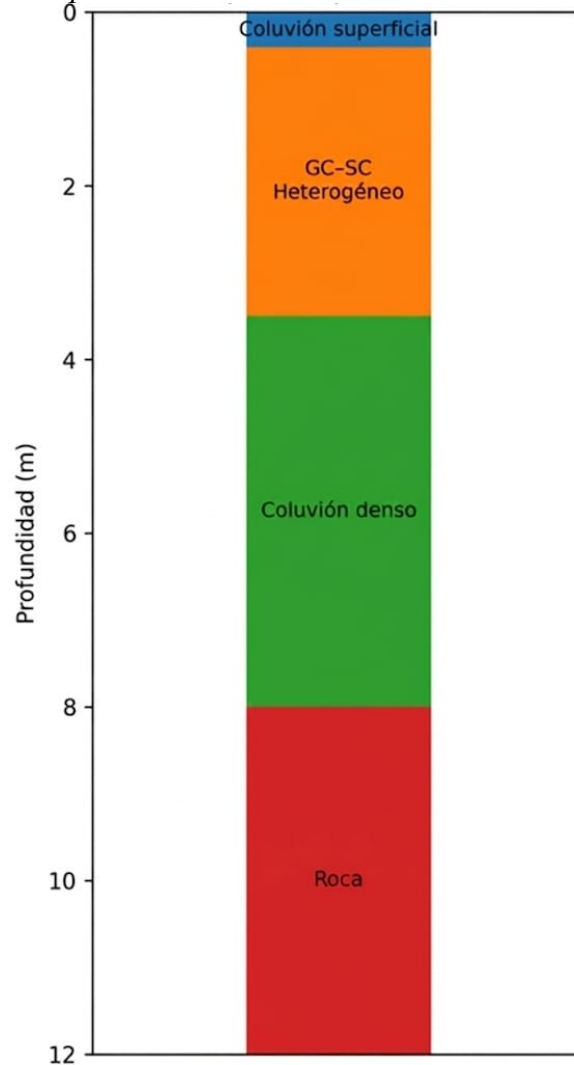
- Cohesión, c : variable (10 – 40 kPa)
- Ángulo de fricción, ϕ : 20 – 32°
- Módulo de deformación, E_s : 10 – 40 MPa
- Módulo de balasto, k_s : 15 – 50 MN/m³

Tipologías de cimentación asociadas:

- Dados escalonados con vigas de amarre
- Cimientos anclados o micropilotes
- Obras complementarias de drenaje y control de escorrentía

Referencia base: Duncan & Wright (2005); Cruden & Varnes (1996); Coduto et al. (2013)

Figura 10. Perfil estratigráfico depósitos coluviales de ladera



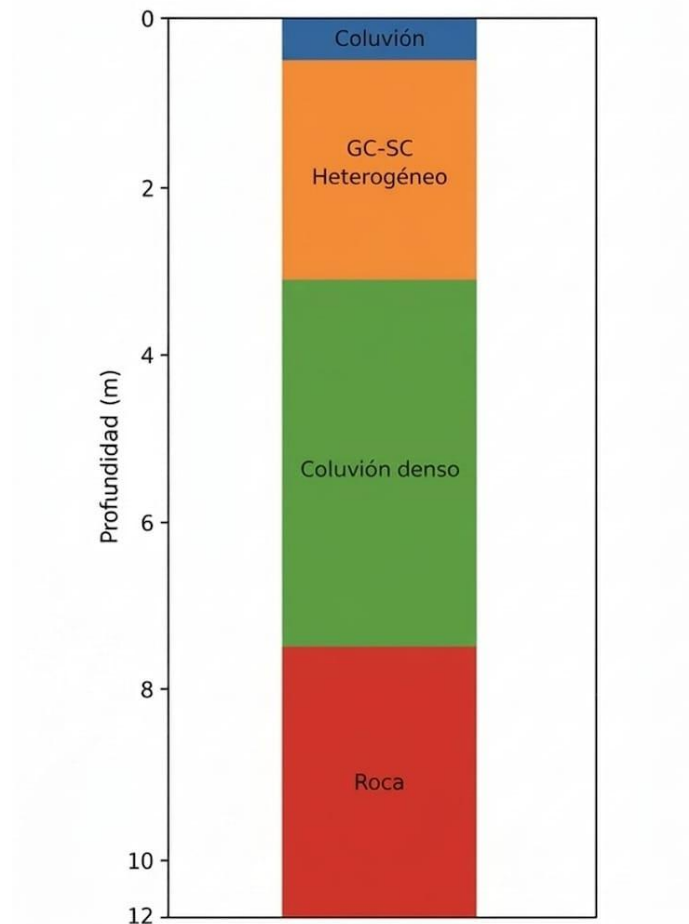
Fuente: Elaboración propia

Comportamiento en suelos residuales sobre roca

Cuando la roca competente se encuentra a poca profundidad, las cimentaciones superficiales suelen presentar buen desempeño estructural; sin embargo, la transición suelo-roca puede generar contrastes de rigidez que afectan la distribución de esfuerzos en la cimentación. Por esta razón, el reconocimiento del espesor del perfil residual (**ver figura 11**) es fundamental para evitar apoyos parcialmente rígidos que produzcan distorsiones localizadas. En el estudio se identificaron como mecanismos principales de riesgo en viviendas livianas el levantamiento por

expansión de arcillas y los asentamientos diferenciales en suelos heterogéneos. Debido a la baja masa estructural de estas edificaciones, el peso propio no siempre es suficiente para contrarrestar fuerzas de tracción vertical, por lo que resulta necesario incorporar sistemas de anclaje entre la cimentación y la superestructura para garantizar la estabilidad del sistema estructural.

Figura 11. *Perfil estratigráfico suelos residuales sobre roca*



Fuente: Elaboración propia

El perfil típico de suelos residuales sobre roca madre presenta una transición gradual entre el material residual superficial y roca meteorizada subyacente. La variabilidad vertical depende del grado de meteorización, mientras que la variabilidad lateral suele ser moderada. Cuando la roca competente se encuentra a poca profundidad, el comportamiento del terreno tiende a ser más

rígido; sin embargo, los contrastes de rigidez entre el suelo residual y la roca pueden generar redistribuciones internas de esfuerzos en la cimentación.

- Estrato 1: 0.00 – 0.50 m

Suelo residual superficial parcialmente alterado, estructura suelta a media, posible presencia de arcillas expansivas.

- Estrato 2: 0.50 – 2.50 m

Material residual más denso, con matriz fina predominante (CL–SC), comportamiento intermedio entre suelo y roca alterada.

- Estrato 3: 2.50 – 5.00 m

Saprolito o roca altamente meteorizada, incremento significativo de rigidez y resistencia.

- Estrato 4: >8.00 m

Roca competente o moderadamente meteorizada, elevada capacidad portante y baja compresibilidad.

Nivel freático tipo:

Generalmente profundo o ausente en condiciones normales, puede presentarse circulación puntual en fracturas o durante periodos de alta precipitación. No suele constituir el factor dominante de diseño, salvo en zonas con infiltración concentrada.

Parámetros geotécnicos de entrada (rangos típicos):

- Cohesión, c : 20 – 60 kPa (en suelo residual)
- Ángulo de fricción, ϕ : 25 – 35°
- Módulo de deformación, E_s : 30 – 80 MPa
- Módulo de balasto, k_s : 40 – 120 MN/m³

La **Tabla 4** resume la relación entre las tipologías de suelo identificadas y los sistemas de cimentación con mejor desempeño, indicando el riesgo geotécnico dominante y el nivel de compatibilidad con viviendas livianas. Esta síntesis facilita la selección preliminar de cimentaciones adecuadas según el tipo de suelo en el contexto rural de Boyacá.

Tabla 4. *Relación entre tipología de suelo, riesgo geotécnico y sistema de cimentación recomendado*

Tipología de suelo	Cimentación con mejor desempeño	Riesgo dominante	Compatibilidad
Finos cohesivos (CL–CH)	Placa flotante rígida	Expansión y levantamiento diferencial	Alta (si es continua)
Granulares densos	Zapatas + vigas de amarre	Reacomodación si saturado	Alta
Orgánicos y blandos	Micropilotes / hincados	Asentamiento excesivo	Media–Alta (condicionada)
Coluviales de ladera	Placa continua o sistema profundo	Heterogeneidad lateral	Media
Residuales sobre roca	Zapatas superficiales	Contraste suelo–roca	Alta

Fuente: Elaboración propia con base en NSR-10, Título H (H.4, H,7)

Los resultados muestran que el desempeño de las cimentaciones en viviendas no convencionales depende principalmente del comportamiento deformacional del suelo, más que de su resistencia última. En suelos expansivos y perfiles heterogéneos, la continuidad y rigidez global de la cimentación son claves para controlar asentamientos diferenciales, a los cuales las estructuras livianas son más sensibles. Por ello, el diseño debe priorizar sistemas de cimentación continuos y anclajes estructurales efectivos. Además, se comprobó que seleccionar la cimentación según la tipología del suelo reduce la vulnerabilidad estructural y mejora la compatibilidad suelo–estructura en zonas rurales de Boyacá.

Análisis de interacción suelo–estructura mediante el modelo de Winkler

Para fortalecer el análisis comparativo del comportamiento estructural entre viviendas convencionales y no convencionales, se propone formalizar la interacción suelo–estructura mediante un modelo mecánico simplificado de tipo Winkler, consistente con el enfoque metodológico adoptado en esta investigación, en el cual el suelo se idealiza como un medio deformable representado por resortes elásticos independientes y la cimentación como un elemento estructural con rigidez propia. Este enfoque resulta adecuado para análisis comparativos preliminares, ya que permite relacionar directamente la rigidez del sistema estructural, la presión transmitida al terreno y la deformación resultante del apoyo.

El sistema completo puede representarse como superestructura + cimentación + suelo deformable donde:

- la **superestructura** aporta cargas verticales P y rigidez global K_e
- la **cimentación** redistribuye las cargas sobre un área de apoyo A
- el **suelo** ofrece una reacción elástica proporcional al asentamiento local.

Bajo la hipótesis de Winkler, la reacción del suelo en cualquier punto se expresa como:

$$q = k_s \cdot s$$

Esta ecuación expresa una relación carga–deformación lineal local, suficiente para comparar el desempeño relativo de distintas tipologías de vivienda sobre diferentes suelos.

En un esquema estructural simplificado la **vivienda convencional** se idealiza como una estructura de mayor masa y rigidez global, usualmente en mampostería confinada o concreto, apoyada sobre zapatas corridas, zapatas aisladas o losa de cimentación.

Estructura rígida = cimentación rígida = suelo deformable

Mecánicamente, este sistema presenta:

- mayor carga vertical total P_c
- mayor presión media de contacto
- mayor capacidad para contrarrestar levantamientos por expansión
- menor tolerancia a distorsiones angulares si la deformación del suelo es diferencial.

Por otro lado, la **vivienda no convencional** se idealiza como una estructura de baja masa y menor rigidez global, como wood frame, steel frame o guadua, apoyada sobre cimentaciones superficiales livianas, plataformas o sistemas semielevados.

Estructura liviana = cimentación ligera = suelo deformable

Este sistema presenta:

- menor carga vertical total P_{nc}
- menores presiones transmitidas al suelo
- menor capacidad para oponerse a subpresiones por hinchamiento
- mayor sensibilidad a asentamientos diferenciales y rotaciones del apoyo.

La presión media de contacto transmitida por la cimentación al terreno puede expresarse como:

$$q = \frac{p}{A}$$

donde:

- P = carga total transmitida por la estructura
- A = área efectiva de apoyo de la cimentación

Para una vivienda convencional:

$$q_c = \frac{P_c}{A_c}$$

Para una vivienda no convencional:

$$q_{nc} = \frac{P_{nC}}{A_{nC}}$$

En general:

$$P_C > P_{nC}$$

Pero esto no implica automáticamente peor comportamiento geotécnico de la vivienda convencional ni mejor comportamiento de la no convencional. El punto importante es que el asentamiento depende de la relación entre carga aplicada, rigidez de la cimentación y deformabilidad del suelo.

Si se asume una cimentación rígida con presión aproximadamente uniforme, el asentamiento medio puede estimarse de forma simplificada como:

$$w = \frac{q}{k_s}$$

o reemplazando $q = P/A$:

$$w = \frac{P}{A k_s}$$

De aquí se observa que el asentamiento aumenta cuando:

- aumenta la carga P
- disminuye el área de cimentación A
- disminuye la rigidez del suelo k_s .

No obstante, en estructuras livianas aparece otro fenómeno importante: aunque P sea pequeño, si el terreno presenta expansión o deformaciones diferenciales, la estructura puede sufrir daño por su menor capacidad de estabilización del apoyo.

Para representar con mayor formalidad la interacción, la cimentación continua puede idealizarse como una viga o losa sobre resortes de Winkler. La ecuación diferencial clásica del sistema es:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + k_s b w(x) = p(x)$$

donde:

- E = módulo de elasticidad del elemento de cimentación
- I = inercia de la cimentación
- b = ancho tributario de la cimentación
- k_s = módulo de balasto del suelo
- $w(x)$ = deflexión vertical
- $p(x)$ = carga distribuida aplicada por la superestructura

Esta ecuación muestra que la respuesta del sistema depende de dos rigideces en competencia:

1. Rigidez estructural de la cimentación: EI
2. Rigidez del suelo: k_s

Por tanto:

- si EI es alto, la cimentación redistribuye mejores cargas y reduce deformaciones diferenciales
- si k_s es bajo, el terreno se deforma más y la estructura es más vulnerable
- si ambos son bajos, el sistema se vuelve altamente sensible a distorsiones.

La **Tabla 5** presenta una matriz de recomendaciones de cimentación basada en la clasificación geotécnica del suelo (SUCS) y los riesgos asociados. Relaciona tipologías de suelo, cimentación recomendada, riesgo geotécnico y criterios de diseño, funcionando como una

herramienta para la selección preliminar de cimentaciones en viviendas no convencionales en zonas rurales de Boyacá, considerando la interacción suelo–estructura.

Tabla 5. *Matriz de recomendaciones de cimentación basada en la clasificación geotécnica del suelo y riesgos asociados*

Tipología de Suelo	Cimentación Recomendada	Justificación Técnica	Riesgo Geotécnico Principal	Recomendaciones de Diseño
Suelos finos cohesivos (CL–CH)	Placa flotante rígida continua	Distribuye cargas uniformemente y reduce deformaciones diferenciales causadas por cambios volumétricos del suelo.	Hinchamiento y asentamientos diferenciales por variaciones de humedad.	Diseñar con suficiente rigidez estructural; incluir subbase granular drenante y control perimetral de humedad.
Suelos granulares densos	Zapatas aisladas conectadas con vigas de amarre	Permite transmisión eficiente de cargas puntuales en suelos con buena capacidad portante.	Reacomodación del material si existe saturación o pérdida de confinamiento.	Verificar densidad relativa y nivel freático; garantizar compactación y drenaje adecuados.
Suelos orgánicos y rellenos blandos	Micropilotes o elementos hincados (sistema profundo)	Transfiere cargas a estratos competentes, evitando dependencia del suelo superficial blando.	Asentamientos excesivos y consolidación progresiva.	Determinar profundidad de estrato firme mediante estudio geotécnico; diseñar cabezal rígido de conexión.
Depósitos coluviales de ladera	Placa continua rígida (o sistema profundo si es necesario)	Compensa la variabilidad lateral y heterogeneidad del terreno mediante redistribución estructural.	Inestabilidad de ladera y pérdida de soporte por saturación.	Evaluar estabilidad global del talud; implementar drenajes y refuerzo estructural bidireccional.
Suelos residuales sobre roca	Zapatas superficiales sobre estrato competente verificado	Aprovecha la capacidad portante de la roca cercana, minimizando asentamientos.	Diferencias de rigidez entre roca sana y material meteorizado.	Retirar material alterado; garantizar contacto uniforme suelo–roca.

Fuente: Elaboración propia con base en NSR-10, Título H (H.4, H.7)

La matriz de recomendaciones y criterios de profundidad de desplante (Df) integra la tipología geotécnica del suelo, el problema geotécnico dominante y las soluciones de cimentación sugeridas. En Boyacá, la Df se define según el comportamiento del suelo, considerando zonas activas de expansión, heterogeneidad en depósitos coluviales y presencia de estratos competentes en suelos blandos. Este enfoque, incorporado en la matriz, permite reducir asentamientos diferenciales y levantamientos por cambios de humedad, especialmente en viviendas livianas, en concordancia con la NSR-10.

La **Tabla 6** presenta los criterios técnicos para definir la profundidad de desplante (Df) según la tipología geotécnica del suelo y el problema geotécnico dominante. Estos lineamientos permiten orientar la ubicación segura de la cimentación, considerando las condiciones del terreno y las recomendaciones constructivas.

Tabla 6. *Criterios técnicos de profundidad de desplante (Df) según tipología geotécnica*

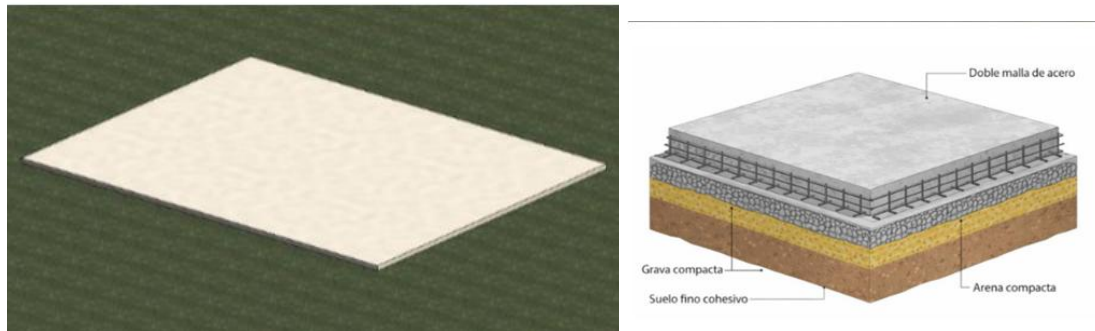
Tipología de suelo	Problema geotécnico dominante	Criterio técnico de Df	Rango sugerido Df (m)	Observaciones constructivas
Suelos finos cohesivos (CL–CH)	Expansión y contracción estacional	Desplantar por debajo de la zona activa	0.80 – 1.20	Incorporar capa drenante y control de humedad
Suelos granulares (SP–SM–SW)	Reacomodación y posible socavación	Garantizar confinamiento y estrato densificado	0.60 – 0.80	Verificar densificación y drenaje superficial
Suelos orgánicos y rellenos blandos	Asentamientos excesivos	Alcanzar estrato competente o usar pilotes	Variable según estrato	Evaluar transferencia por fricción lateral
Depósitos coluviales de ladera	Heterogeneidad lateral	Atravesar manto coluvial inestable	≥ 1.00 (según espesor)	Amarre estructural obligatorio
Suelos residuales sobre roca	Transición suelo–roca	Apoyar en horizonte residual denso o roca firme	0.60 – 1.00	Verificar continuidad del estrato competente

Fuente: Elaboración propia con base en NSR-10, Título H (H.4, H.7)

Finalmente, se presentan los diseños de cimentación según tipología de suelo:

Placa flotante rígida continua

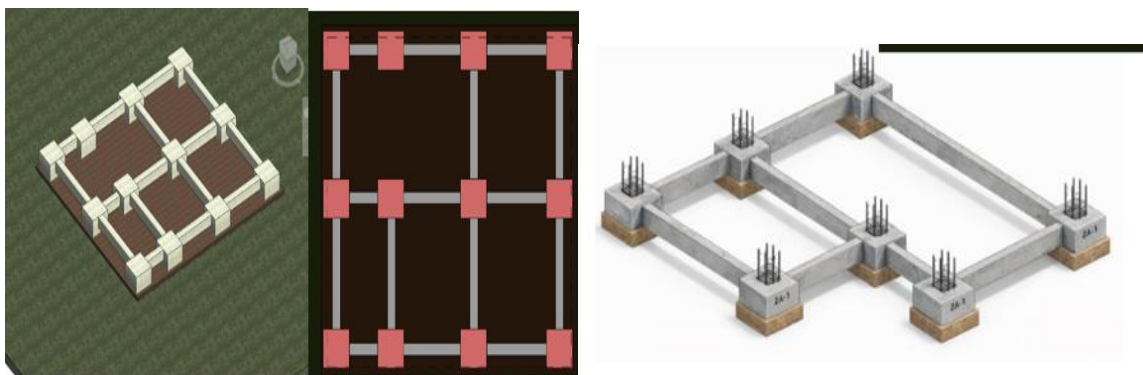
La **Figura 12** muestra el modelo tridimensional de una losa maciza de concreto reforzado que cubre toda el área de la vivienda y funciona como cimentación superficial continua, distribuyendo las cargas de forma uniforme. Esta solución es adecuada para suelos con comportamiento volumétrico variable, ya que su continuidad reduce concentraciones de esfuerzo y el riesgo de fisuración por movimientos diferenciales.

Figura 12. *Placa flotante rígida continua*

Fuente: Elaboración propia

Zapatas aisladas conectadas con vigas de amarre

En la **figura 13** se observa una retícula estructural compuesta por dados o zapatas puntuales ubicadas bajo cada apoyo vertical, unidas entre sí mediante vigas de amarre en ambas direcciones. El sistema muestra claramente la diferenciación entre elementos que reciben cargas concentradas y aquellos que garantizan la conexión estructural del conjunto. La función principal de las vigas no es incrementar la capacidad portante, sino asegurar que los apoyos trabajen solidariamente. De esta manera, si se produce una leve variación en el comportamiento del suelo bajo alguna zapata, la estructura puede redistribuir esfuerzos hacia los apoyos contiguos. Este esquema resulta apropiado en suelos con capacidad portante media a alta y deformaciones relativamente controladas.

Figura 13. *Zapatas aisladas conectadas con vigas de amarre*

Fuente: Elaboración propia

Micropilotes o elementos hincados (sistema profundo)

La **figura 14** muestra una losa apoyada sobre elementos verticales que atraviesan el estrato superficial hasta alcanzar capas más resistentes en profundidad. El modelo permite visualizar claramente la transferencia de cargas desde la placa hacia los pilotes, los cuales actúan como elementos estructurales intermedios entre la superestructura y el terreno competente.

Este sistema se plantea cuando las capas superiores presentan baja resistencia o alta compresibilidad. En lugar de apoyar directamente sobre el suelo superficial, las cargas se conducen hacia niveles más firmes, reduciendo significativamente el riesgo de asentamientos excesivos. Se trata de una alternativa técnicamente más compleja, pero necesaria cuando las condiciones del terreno superficial no garantizan estabilidad a largo plazo.

Figura 14. *Micropilotes o elementos hincados (sistema profundo)*



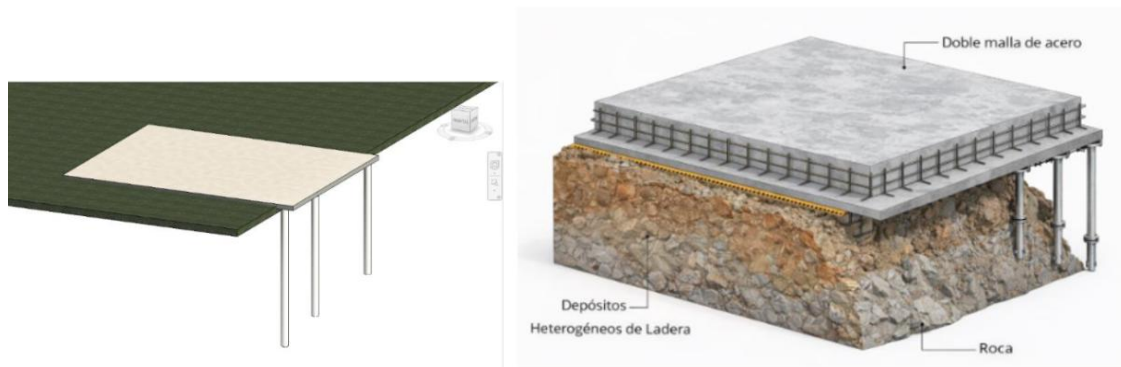
Fuente: Elaboración propia

Placa continua rígida con apoyo profundo parcial

En la **figura 15** se aprecia una losa continua que combina apoyo directo sobre el terreno con apoyo en elementos profundos en sectores específicos. La imagen sugiere una condición donde el perfil del suelo no es uniforme y algunas zonas requieren refuerzo adicional para garantizar estabilidad.

La placa actúa como elemento integrador que distribuye internamente las cargas, mientras que los apoyos profundos absorben las solicitaciones en áreas críticas. Este tipo de solución permite adaptarse a variaciones laterales del subsuelo, frecuentes en terrenos con depósitos coluviales o pendientes pronunciadas, donde la capacidad del suelo puede cambiar en distancias cortas.

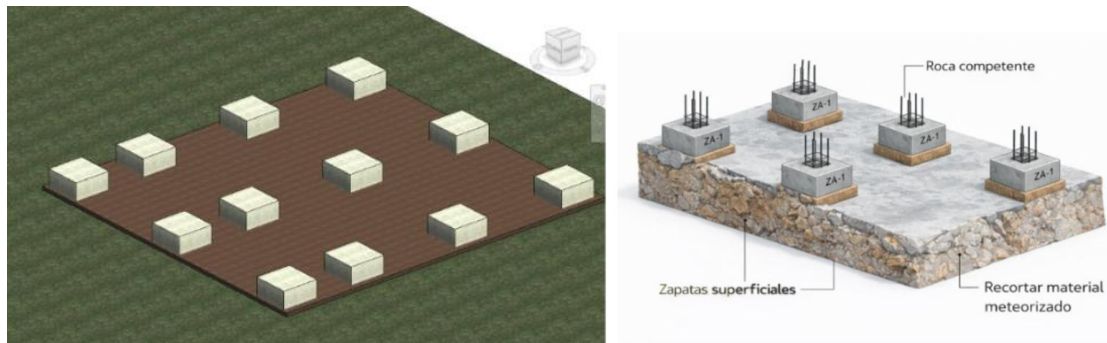
Figura 15. *Placa continua rígida con apoyo profundo parcial*



Fuente: Elaboración propia

Zapatas superficiales sobre estrato competente verificado

La **Figura 16** muestra zapatas aisladas apoyadas directamente sobre un estrato de suelo con buenas propiedades mecánicas, sin elementos profundos ni sistemas adicionales de rigidización. Esta solución es viable cuando el estudio geotécnico confirma un estrato resistente a poca profundidad, con baja compresibilidad y comportamiento estable, siempre que se garantice una adecuada profundidad de desplante y control constructivo.

Figura 16. Zapatas superficiales sobre estrato competente verificado

Fuente: Elaboración propia

5. Discusión

El análisis realizado muestra que el desempeño de las cimentaciones en viviendas no convencionales en zonas rurales de Boyacá depende principalmente del comportamiento deformacional del suelo, más que de su resistencia última. En estructuras livianas, como las construidas en guadua o sistemas industrializados, los asentamientos diferenciales y las variaciones volumétricas por cambios de humedad tienen mayor influencia en la estabilidad estructural.

En suelos finos cohesivos del Altiplano Cundiboyacense, predominan fenómenos de expansión y retracción estacional, que generan levantamientos diferenciales. En estos casos, las cimentaciones continuas o sistemas rígidos de amarre presentan mejor desempeño que apoyos aislados, al redistribuir esfuerzos y reducir deformaciones localizadas.

En suelos granulares densos, el comportamiento es más estable y los asentamientos suelen mantenerse dentro de rangos admisibles; sin embargo, la saturación temporal puede reducir la rigidez del terreno, por lo que el control de drenajes y la preparación adecuada de la subbase resultan fundamentales.

Los suelos orgánicos y rellenos blandos representan las condiciones más desfavorables, debido a su alta compresibilidad y baja resistencia, lo que limita el uso de cimentaciones

superficiales y evidencia la necesidad de criterios de localización preventiva de viviendas en zonas rurales.

En depósitos coluviales y suelos residuales sobre roca, la heterogeneidad del perfil y la pendiente influyen en el comportamiento del terreno, por lo que el diseño debe considerar drenaje, escalonamientos y sistemas de anclaje que mejoren la interacción suelo–estructura.

La investigación también evidencia que, aunque las viviendas livianas transmiten menores cargas, presentan mayor sensibilidad a deformaciones diferenciales, por lo que es necesario priorizar la continuidad estructural y la rigidez del sistema de cimentación. Asimismo, la aplicación de la NSR-10 permite enmarcar las recomendaciones dentro del reglamento colombiano, aunque muchos criterios están orientados a edificaciones convencionales.

El análisis comparativo realizado evidencia que el comportamiento estructural de las viviendas analizadas está condicionado tanto por las propiedades mecánicas del suelo como por las características estructurales de cada tipología constructiva.

En el caso de las viviendas convencionales, el mayor peso estructural genera presiones más elevadas sobre el terreno, lo que puede incrementar la magnitud de los asentamientos en suelos compresibles o de baja rigidez. Sin embargo, la mayor rigidez estructural de estas edificaciones permite redistribuir las cargas y reducir los efectos asociados a deformaciones diferenciales del terreno.

Por otra parte, las viviendas no convencionales presentan una reducción significativa en las cargas transmitidas al suelo debido a su menor masa estructural. Esta condición resulta favorable en términos de capacidad portante del terreno y puede representar una ventaja en suelos con baja resistencia o alta compresibilidad.

No obstante, la menor rigidez global de estas estructuras puede incrementar la sensibilidad frente a deformaciones diferenciales del terreno, particularmente en suelos expansivos o en depósitos heterogéneos donde las propiedades geotécnicas presentan variaciones espaciales.

En estos casos, las deformaciones del terreno pueden generar distorsiones en el sistema estructural que afecten el comportamiento de elementos no estructurales o generen problemas funcionales en la edificación.

Por lo tanto, la selección del sistema de cimentación debe considerar no solo la capacidad portante del suelo, sino también la compatibilidad deformacional entre el terreno, la cimentación y la superestructura, con el fin de garantizar un comportamiento estructural adecuado frente a posibles deformaciones del subsuelo.

Finalmente, la elaboración de una matriz o catálogo de recomendaciones geotécnicas permite relacionar tipologías de suelo con sistemas de cimentación adecuados, aportando una herramienta técnica útil para orientar decisiones de diseño en contextos rurales, aunque sin sustituir los estudios geotécnicos específicos. En conjunto, los resultados indican que la reducción de la vulnerabilidad estructural depende de la compatibilidad entre suelo, sistema estructural y tipo de cimentación.

6. Conclusiones

La presente investigación permitió analizar la relación entre las tipologías geotécnicas predominantes del departamento de Boyacá y la selección de sistemas de cimentación para viviendas no convencionales construidas con sistemas estructurales livianos. A partir de la revisión geológica, geomorfológica y geotécnica del territorio se identificaron condiciones de suelo heterogéneas que influyen directamente en el comportamiento de las cimentaciones y en la estabilidad de las edificaciones rurales.

El análisis evidenció que los suelos del departamento pueden agruparse en cinco tipologías geotécnicas representativas: suelos finos cohesivos, suelos granulares, suelos orgánicos y rellenos blandos, depósitos coluviales de ladera y suelos residuales sobre roca. Cada una presenta propiedades físico–mecánicas particulares que condicionan la capacidad portante, los asentamientos y la respuesta del terreno frente a cambios de humedad o sollicitaciones sísmicas.

Los resultados del análisis de interacción suelo–estructura muestran que las viviendas construidas con sistemas estructurales livianos, como guadua, wood frame y steel frame, presentan comportamientos particulares que deben considerarse en la selección de la cimentación. Debido a su menor peso, estas edificaciones transmiten cargas reducidas al terreno, lo que modifica la forma en que se desarrollan los asentamientos y la interacción con el suelo de fundación.

La baja masa estructural característica de los sistemas constructivos livianos reduce las presiones transmitidas al terreno, lo que puede resultar favorable en suelos con capacidad portante limitada o con tendencia a deformaciones compresibles. Sin embargo, esta condición también puede aumentar la sensibilidad frente a asentamientos diferenciales en suelos heterogéneos o en materiales cohesivos con comportamiento expansivo.

En estructuras construidas en **guadua**, la flexibilidad del sistema permite cierta adaptación a deformaciones del terreno, lo que puede disminuir la aparición de daños asociados a asentamientos diferenciales moderados. No obstante, es necesario garantizar continuidad en la cimentación mediante losas o vigas de cimentación conectadas, con el fin de evitar deformaciones localizadas que afecten la estabilidad estructural.

Para edificaciones construidas mediante sistemas **wood frame**, la baja masa estructural y la distribución uniforme de cargas favorecen el uso de cimentaciones superficiales continuas, como losas de cimentación o zapatas conectadas con vigas de amarre. Estas soluciones permiten

redistribuir las cargas y controlar deformaciones diferenciales, especialmente en suelos cohesivos o con variabilidad lateral.

En el caso de estructuras **steel frame**, la mayor rigidez del sistema puede mejorar el comportamiento frente a deformaciones del terreno. Sin embargo, debido a su ligereza, se recomienda emplear cimentaciones que proporcionen continuidad estructural y una adecuada distribución de cargas, particularmente en suelos expansivos o en depósitos coluviales.

Los resultados del estudio indican que en suelos granulares densos y con adecuada permeabilidad las cimentaciones superficiales, como zapatas aisladas conectadas mediante vigas de amarre o losas de cimentación, pueden ofrecer un desempeño adecuado para viviendas livianas, siempre que se garantice una correcta compactación del terreno y control del drenaje superficial.

Por el contrario, en suelos finos cohesivos y expansivos del altiplano cundiboyacense se requiere especial atención al control de humedad y a la rigidez del sistema de cimentación, debido a la posibilidad de levantamientos por hinchamiento y asentamientos diferenciales asociados a variaciones volumétricas del suelo.

En zonas de ladera donde predominan depósitos coluviales heterogéneos, la variabilidad granulométrica y los cambios de rigidez del terreno pueden generar comportamientos geotécnicos complejos, incrementando la probabilidad de deformaciones diferenciales. En estos casos, el diseño de la cimentación debe considerar soluciones que redistribuyan las cargas e incorporar medidas de drenaje y estabilización del terreno.

Por otra parte, los suelos orgánicos y rellenos blandos presentan baja capacidad portante y alta compresibilidad, lo que puede generar asentamientos significativos incluso en edificaciones livianas. En estas condiciones se recomienda evitar su uso como estrato de apoyo directo o aplicar técnicas de mejoramiento del terreno antes de la construcción.

Uno de los principales aportes de esta investigación consiste en la elaboración de una matriz técnica de recomendaciones que relaciona las tipologías geotécnicas predominantes en Boyacá con alternativas de cimentación compatibles con sistemas estructurales livianos. Esta herramienta permite orientar la selección preliminar de soluciones de cimentación en contextos rurales donde no siempre se dispone de estudios geotécnicos detallados.

Asimismo, el estudio evidencia la importancia de considerar la interacción suelo–estructura como un sistema integrado en el diseño de edificaciones livianas. La compatibilidad entre el tipo de suelo, el sistema de cimentación y la superestructura constituye un factor clave para garantizar la estabilidad y durabilidad de las viviendas rurales.

Finalmente, se concluye que la aplicación de criterios geotécnicos basados en tipologías de suelo y en los lineamientos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) contribuye a mejorar la toma de decisiones en la selección de cimentaciones para viviendas no convencionales, aportando una base técnica útil para futuros proyectos de vivienda rural en regiones con condiciones geológicas similares.

7. Recomendaciones

Se recomienda que futuros proyectos de vivienda rural en el departamento de Boyacá incorporen estudios geotécnicos básicos que permitan identificar con mayor precisión las propiedades del suelo y su comportamiento frente a cargas estructurales, especialmente en zonas con alta variabilidad geológica.

Asimismo, es importante promover la implementación de sistemas de drenaje y control de humedad en cimentaciones construidas sobre suelos finos cohesivos o expansivos, con el fin de reducir variaciones volumétricas del terreno que puedan generar levantamientos diferenciales.

En zonas de ladera o en terrenos con depósitos coluviales heterogéneos, se recomienda realizar evaluaciones adicionales de estabilidad y considerar sistemas de cimentación que proporcionen mayor rigidez estructural, así como medidas de estabilización del terreno.

Finalmente, se sugiere que futuras investigaciones profundicen en el análisis experimental y en estudios geotécnicos de campo que permitan validar los parámetros utilizados en esta investigación y mejorar los criterios de diseño de cimentaciones para viviendas livianas en contextos rurales.

8 Referencias

- AIS. (2010). *Asociación Colombiana de Ingenieria Sismica*. Obtenido de Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.
- Alcalá, J. (2023). *Universidad Politecnica de Valencia*. Obtenido de Cimentaciones : <http://www.jualgon.webs.upv.es/imagenes/Cimentaciones.pdf>
- Alcaldía Municipal de Toledo. (2006). *Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Toledo – Norte de Santander. Diagnóstico rural – Subsistema biofísico*. Obtenido de Repositorio CDIM – ESAP: <https://repositoriocdim.esap.edu.co/>
- ASTM. (2020). *ASTM International*. Obtenido de Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System – ASTM D2487).: <https://www.astm.org/d2487>
- Bowles, J. E. (1996). Obtenido de Foundation analysis and design. McGraw-Hill.
- Budi, G. S. . (2017). Obtenido de Settlement of Residential Houses Supported by Piled Foundation Embedded in Expansive Soil. *Procedia Engineering*, 171, 454–460: <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.01.356>

- Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. (2011). *Pearson Education*. Obtenido de eotechnical engineering: Principles and practices (2nd ed.).
- Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. (2013). Obtenido de oundation Design: Principles and Practices (3rd ed.). .
- CONARSAC. (1 de Agosto de 2023b). *CONARSAC*. Obtenido de ¿Qué son las cimentaciones profundas?: tipos y en qué casos se utiliza: <https://conarsac.com>
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics (7th ed.)*. Obtenido de Taylor & Francis.: <https://www.scirp.org/>
- Das, B. M. (2016). *Das, B. M.* Obtenido de Principles of geotechnical engineering (8th ed.). Stamford, CT: Cengage Learning.
- Das, B. M. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering (8th ed.)*. Obtenido de Cengage Learning: <https://es.slideshare.net/>
- de Silva, G. P., & Vardon, P. J. (2010). Obtenido de Geotechnical properties of unsaturated volcanic soils. *Engineering Geology*, 114(3–4), 321–334.: <https://www.sciencedirect.com>
- Duque Escobar, Gonzalo (2003) Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.<http://www.bdigital.unal.edu.co>
- EGC. (20 de Julio de 2023). *Estabilidad del terreno: Factores clave a tener en cuenta en los estudios geotécnicos*. Obtenido de egc consulting: <https://egcconsulting.net/estabilidad-del-terreno-factores-clave-a-tener-en-cuenta-en-los-estudios-geotecnicos/>
- FHWA. (2005). *Federal Highway Administration*. Obtenido de Micropile design and construction guidelines (FHWA-NHI-05-039).
- Gazetas, G. (1991). Obtenido de Foundation vibrations. In H. Y. Fang (Ed.), *Foundation Engineering Handbook* (2nd ed.).

Geological Society of America. (1983). Obtenido de The Decade of North American Geology (DNAG).

Gobernación de Boyacá. (2018). *Gobernación de Boyacá*. Obtenido de Estructura biofísica (documento de planeación departamental): <https://planeacion.boyaca.gov.co>

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). Obtenido de An Introduction to Geotechnical Engineering (2nd ed.). Pearson.

IDEAM. (2019). *Instituto de Hidrología, M. y*. Obtenido de Caracterización de suelos y coberturas vegetales en ecosistemas de alta montaña en Boyacá. Bogotá.

IDEAM. (24 de 10 de 2024). *GOV.CO*. Obtenido de Nivel freático: <https://www.ideam.gov.co/atencion-y-servicios-a-la-ciudadania/glosario/nivel-freatico>

IGAC. (2005). *Mapa de amenaza sísmica del departamento de Boyacá. Bogotá, Colombia*. Obtenido de <https://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/SUELOS%20DE%20BOYACA%20005.pdf>

IGAC. (2012). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Obtenido de Estudios generales de suelos y zonificación de tierras en regiones andinas de Colombia. Bogotá D. C., Colombia: IGAC.: <https://biblioteca.igac.gov.co/>

IGAC. (2014). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Obtenido de Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá.

INGEOMINAS . (Enero de 2000). *Ministerio de minas y energía*. Obtenido de Mapa Geologico del Departamento de Boyacá .

INGEOMINAS. (1997).

Ingeotécnica. (s.f.). *Ingeotécnica*. Obtenido de ¿Qué es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)?.: <https://www.ingeotecnica.com>

Instituto de vivienda . (2005). *Universidad de Chile*. Obtenido de Concepto de autoconstrucción. Facultad de Arquitectura y Urbanismo: <https://infoinvi.uchilefau.cl/glosario/autoconstruccion/>

INVIAS. (2020). *INVIAS*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/>

Kramer, S. L. (1996). *Prentice Hall*. Obtenido de Geotechnical earthquake engineering.

Ministerio de Vivienda, C. y. (2010). *Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia*. Obtenido de <https://www.minvivienda.gov.co/>

Ministerio de Vivienda, C. y. (2014). *Decreto 1807*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2023). Obtenido de Vivienda no convencional: <https://www.minvivienda.gov.co/>

Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). Obtenido de Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering.

Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1974). Obtenido de Elastic solutions for soil and rock mechanics. .

Renzoni, G. (1981). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de Geología del cuadrángulo J-12 Tunja (Boletín/Documento técnico).

Rodríguez González, J. L., & Gualdrón Alfonso, D. F. (2018). *Rodríguez González, J. L., & Gualdrón Alfonso, D. F.* Obtenido de Aplicaciones SIG en estudios de microzonificación sísmica para ciudades intermedias. Caso Tunja, Boyacá. En Aplicaciones SIG para la ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).: <https://repositorio.uptc.edu.co>

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). *University of California, Berkeley*. Obtenido de Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses.

SENCICO. (2023). Obtenido de Sistemas constructivos no convencionales: <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887231-sistemas-constructivos-no-convencionales>

Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de Geología de la Cordillera Oriental de Colombia. Servicio Geológico Colombiano.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Editorial SGC*. Obtenido de Las amenazas por movimientos en masa de Colombia: una visión a escala 1:100.000 [Libro]: <https://libros.sgc.gov.co/>

Servicio Geológico Colombiano. (2023). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de Mapa Geológico de Colombia 2023 (escala 1:1.500.000) [Portal oficial]: <https://www2.sgc.gov.co/>

SGC. (2007). *SGC – Record Center*. Obtenido de Mapa geológico del departamento de Boyacá (Documento técnico en PDF).: <https://recordcenter.sgc.gov.co/>

SGC. (2015). *SGC*. Obtenido de Caracterización geológica y geotécnica de suelos volcánicos en Colombia. Bogotá D. C., Colombia: SGC.: <https://www.sgc.gov.co/>

SIERRA, J. J. (2020). Obtenido de Revisión de literatura: capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos parcialmente saturados: <https://apiescuelaing.bibliolabtech.com>

SILVA, H. E. (2018). *UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA*. Obtenido de DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE ÁREAS EN AMENAZA Y ESCENARIOS EN: <https://repositorio.uptc.edu.co/>

SILVA, H. E. (2018). *UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA*.

Obtenido de DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE ÁREAS EN AMENAZA Y

ESCENARIOS: <https://repositorio.uptc.edu.co/>

Sísmica, A. C. (2010). *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*. Obtenido de NSR-10:

Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. AIS.

Solano, A. J. (2000). *Ingeominas*. Obtenido de MAPA GEOLOGICO DEL DEPARTAMENTO:

<https://recordcenter.sgc.gov.co/>

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Wiley*. Obtenido de Soil mechanics in engineering

practice (3rd ed.).

Terzagui, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. *Wiley, New York*. Obtenido de

<http://dx.doi.org/10.1002/9780470172766>

Velandia Nossa, F. A. (2015). *Repositorio Institucional UPTC*. Obtenido de ESTUDIO

GEOLÓGICO-GEOFÍSICO PARA LA BUSQUEDA DE AGUAS:

<https://repositorio.uptc.edu.co/>

Wolf, J. P. (1985). Obtenido de Dynamic Soil–Structure Interaction. Prentice-Hall.

Apéndices

Apéndice A. *Memorias de Cálculo (Predimensionamiento).*



PREDIMENSIONAMIE
NTO.xlsx

Apéndice B. Modelo cimentación**Figura 17. Delimitación de cimentación**

Fuente: Proyecto Vivienda Rural Sostenible Semillero EcoROADS

Figura 18. *Acero de refuerzo en cimentación*



Fuente: Proyecto Vivienda Rural Sostenible Semillero EcoROADS

Figura 19. *Losa de cimentación*



Fuente: Proyecto Vivienda Rural Sostenible Semillero EcoROADS