

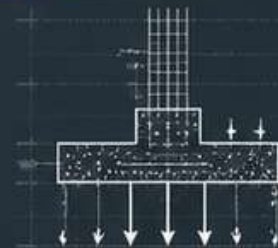
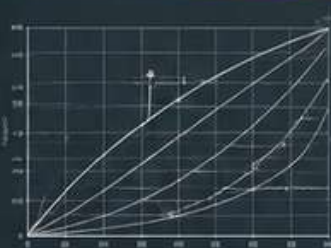
ZONIFICACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA PARA EL DESARROLLO URBANO EN LA CIUDAD ANDINA DE PILLCOMARCA

Técnicas para cimentaciones seguras y ordenamiento territorial

Primera Edición Digital

HN
Flo Nexus
EDITORIAL

Erasmus Alejandro FERNÁNDEZ SIXTO.
Edgar Grimaldo MATTO PABLO.
Elisa Raquel QUINTANILLA HERRERA.
Mauro Antonio DOMÍNGUEZ MAGINO.

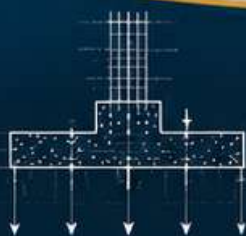


ZONIFICACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA PARA EL DESARROLLO URBANO EN LA CIUDAD ANDINA DE PILCOMARCA

Técnicas para cimentaciones seguras y ordenamiento territorial

Primera Edición Digital

HN
Flo Nexus
EDITORIAL



Erasmó Alejandro FERNÁNDEZ SIXTO.
Edgar Grimaldo MATTO PABLO.
Elisa Raquel QUINTANILLA HERRERA.
Mauro Antonio DOMÍNGUEZ MAGINO.



ZONIFICACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA PARA EL DESARROLLO URBANO EN LA CIUDAD ANDINA DE PILLCOMARCA

Técnicas para cimentaciones seguras y ordenamiento territorial

© Erasmo Alejandro FERNÁNDEZ SIXTO.

© Edgar Grimaldo MATTO PABLO.

© Elisa Raquel QUINTANILLA HERRERA.

© Mauro Antonio DOMÍNGUEZ MAGINO.

Editor de contenido:

Diseño de cubierta: Ho Nexus

1ª edición digital, julio 2026

Editado por:

© HO NEXUS E.I.R.L.

Dirección legal: Urb. Paseo del Mar Mz I4, Lt 33

Nuevo Chimbote, Santa, Áncash - Perú

Correo electrónico; ed.honexus@gmail.com

teléfono: 978 653 152

<https://books.honexus.org>

DOI: <https://doi.org/10.70504/978-612-99401-8-2>

Reservados todos los derechos de publicación en cualquier idioma; siendo su contenido protegido por la Ley vigente que establece penas de prisión y/o multas a quienes intencionadamente reprodujeren o plagiaran, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica.

Depósito Legal: 2026-07731

ISBN: 978-612-99401-8-2

Revisión por pares:

Este libro (o monografía) fue sometido a evaluación de pares mediante el sistema de doble ciego (doubleblinded review), garantizando la calidad, pertinencia, ética y rigor académico de la obra, conforme a los estándares internacionales de revisión científica y las políticas editoriales de Ho Nexus.

ÍNDICE

PRÓLOGO.....	4
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
PARTE I: CONTEXTO Y FUNDAMENTOS	12
CAPÍTULO 1. El desafío del crecimiento urbano no planificado en Pillcomarca	12
1.1 Crecimiento demográfico y ocupación del suelo sin estudios previos	12
1.2 Consecuencias en la seguridad de las edificaciones	14
1.3 Preguntas que orientan la investigación y objetivos propuestos.....	16
1.4 Hipótesis y variables de estudio	18
CAPÍTULO 2. Bases teóricas para entender el suelo y su comportamiento	21
2.1 ¿Qué es la zonificación geotécnica y por qué es importante?	21
2.2 Conceptos básicos de mecánica de suelos	23
2.3 Experiencias previas en zonificación geotécnica	29
.....	33
PARTE II: METODOLOGÍA Y EXPLORACIÓN DE CAMPO	34
CAPÍTULO 3. Cómo se realizó el estudio.....	34
3.1 Área de estudio: ubicación y características.....	34
3.2 Trabajos de campo: calicatas y muestreo	36
3.3 Ensayos de laboratorio realizados	39
3.4 Procesamiento de datos y elaboración de mapas	44
CAPÍTULO 4. Reconocimiento geológico y geotécnico del terreno	49
4.1 Zona 1 – Área Urbana Central	49
4.2 Zona 2 – Área de Transición.....	52
4.3 Zona 3 – Área de Ladera	54
4.4 Zona 4 – Cayhuayna Alta.....	57
4.5 Zona 5 – Área Urbana Alta	58
4.6 Peligros geológicos identificados	60
PARTE III: RESULTADOS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS	64
CAPÍTULO 5. Propiedades físicas y mecánicas de los suelos por zona	64
5.1 Resultados en la Zona 1: suelos arenosos con limos	64
5.2 Resultados en la Zona 2: suelos granulares homogéneos.....	70
5.3 Resultados en la Zona 3: suelos bien graduados y de baja compresibilidad	75
5.4 Resultados en la Zona 4: suelos arcillo-arenosos de capacidad moderada	82
5.5 Resultados en la Zona 5: arenas arcillosas de baja capacidad de soporte.....	87

.....	94
CAPÍTULO 6. Interpretación y parámetros de diseño.....	95
6.1 Capacidad portante admisible para cada zona	95
6.2 Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción)	99
6.3 Comportamiento frente a la compactación y el CBR	101
6.4 Estimación de asentamientos por consolidación	104
PARTE IV: ZONIFICACIÓN Y RECOMENDACIONES.....	109
CAPÍTULO 7. Mapas de zonificación geológica y geotécnica	109
7.1 Zonificación geodésica y fotogramétrica.....	109
7.2 Mapas de clasificación de suelos (SUCS y AASHTO)	113
7.3 Mapas de capacidad de soporte (CBR)	124
7.4 Mapas de resistencia al corte y compresibilidad	129
CAPÍTULO 8. Conclusiones y recomendaciones para la planificación urbana	139
8.1 Síntesis de resultados por zona	139
8.2 Zonas aptas, condicionadas y no aptas para la construcción.....	144
8.3 Recomendaciones técnicas para cimentaciones.....	148
8.4 Medidas de mitigación de riesgos geológicos	152
8.5 Propuesta de uso de los mapas como herramienta de gestión territorial.....	156
BIBLIOGRAFÍA.....	164

PRÓLOGO

Cuando caminamos por las calles de Pillcomarca, observamos un paisaje urbano en constante transformación: nuevas viviendas que ascienden por las laderas, edificaciones que se elevan sin un estudio previo del terreno, y una ciudad que crece empujada por la necesidad de vivienda y la esperanza de un futuro mejor. Sin embargo, bajo nuestros pies, el suelo cuenta una historia que pocos conocen: una historia de diferentes materiales, de comportamientos variables frente a la humedad y las cargas, de riesgos latentes que pueden manifestarse en forma de grietas, asentamientos o, en el peor de los casos, colapsos estructurales.

Este texto nace de la convicción de que el conocimiento del terreno es la base de toda construcción segura y sostenible. La investigación que aquí se presenta no es un ejercicio académico abstracto, sino una respuesta directa a un problema real: la falta de información geotécnica confiable que oriente la toma de decisiones en el diseño y la planificación urbana. Durante años, los profesionales y las autoridades han trabajado con información fragmentada o simplemente han prescindido de ella, asumiendo riesgos que podrían evitarse.

El estudio que hoy ponemos en manos del lector ha sido posible gracias al trabajo de campo en las cinco zonas del distrito, al riguroso análisis de laboratorio y al esfuerzo por traducir datos técnicos en herramientas prácticas. Hemos buscado que el lenguaje sea claro y accesible, sin perder el rigor científico, porque creemos que el conocimiento debe llegar a todos los actores involucrados en el desarrollo urbano: ingenieros, arquitectos, planificadores, autoridades municipales y también a los ciudadanos que desean construir su vivienda con seguridad.

Esperamos que esta orientación técnica sirva como un instrumento de consulta y referencia, que contribuya a reducir los riesgos geotécnicos, a optimizar los diseños de cimentación y, en última instancia, a construir una ciudad más segura y resiliente. El suelo de Pillcomarca nos habla; solo debemos aprender a escucharlo.

Huánuco, 2026.

RESUMEN

Este manuscrito presenta la zonificación geológica y geotécnica integral del área urbana del distrito de Pillcomarca, en la provincia de Huánuco, Perú. La investigación surge ante el acelerado y desordenado crecimiento urbano que ha llevado a construir viviendas e infraestructura sin el conocimiento adecuado de las características del suelo, poniendo en riesgo la seguridad de la población. A través de una detallada prospección geológica, la excavación de dieciséis calicatas distribuidas en cinco zonas representativas, y la ejecución de ensayos de laboratorio normalizados (granulometría, límites de Atterberg, compactación Proctor, CBR, consolidación, corte directo y triaxial), se han caracterizado las propiedades físicas, mecánicas y geológicas de los suelos. Los resultados revelan una notable heterogeneidad: desde suelos arenosos con limos de baja plasticidad en la zona central, hasta arenas arcillosas con muy baja capacidad de soporte en la zona alta. La integración de estos datos mediante sistemas de información geográfica (SIG) ha permitido elaborar mapas temáticos que clasifican el territorio en áreas favorables, condicionadas y desfavorables para la construcción. El manuscrito concluye con recomendaciones prácticas para el diseño de cimentaciones, la compactación de suelos, el manejo de aguas pluviales y la prevención de riesgos geológicos, constituyendo una herramienta técnica indispensable para ingenieros, arquitectos, urbanistas y autoridades locales.

Palabras clave: Zonificación geotécnica, mecánica de suelos, Pillcomarca, capacidad de soporte (CBR), cimentaciones seguras, ordenamiento territorial.

INTRODUCCIÓN

La urgencia de conocer el suelo en el crecimiento urbano andino

El distrito de Pillcomarca, ubicado en la provincia de Huánuco, en el corazón de la sierra central del Perú, ha experimentado en las últimas décadas un crecimiento demográfico sin precedentes. Según los datos de los censos nacionales del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2018), la población pasó de 23 896 habitantes en 2007 a más de 43 000 en 2017, lo que representa un incremento superior al 80 % en apenas diez años. Este explosivo aumento, impulsado principalmente por la migración rural hacia la ciudad, ha generado una demanda masiva de vivienda que ha sido atendida, en su mayor parte, mediante procesos de autoconstrucción en terrenos periféricos, muchas veces en laderas de fuerte pendiente o en áreas de relleno, sin ningún estudio técnico que verifique la aptitud del suelo para soportar edificaciones.

Esta situación no es exclusiva de Pillcomarca; es un fenómeno común en muchas ciudades intermedias de los Andes peruanos, donde la informalidad urbana y la falta de planificación se combinan con condiciones geológicas y geotécnicas complejas (Dammert-Guardia et al., 2024); (Peirano et al., 2023). La consecuencia es una alta vulnerabilidad estructural, especialmente ante eventos sísmicos o lluvias intensas, que pueden desencadenar fallas en cimentaciones, asentamientos diferenciales e incluso deslizamientos de tierra. El Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, aprobado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2021), en sus normas E.030 (Diseño Sismorresistente) y E.050 (Suelos y Cimentaciones), exige explícitamente la caracterización del suelo como paso previo al diseño estructural. Sin embargo, en la práctica, esta exigencia no se cumple en la mayoría de las construcciones informales, y muchas veces ni siquiera en proyectos formales de menor envergadura.

Ante este panorama, la presente investigación se propuso determinar la zonificación geológica y geotécnica del distrito de Pillcomarca, con el fin de proporcionar una base técnica sólida para la planificación urbana y el diseño seguro de cimentaciones. La zonificación geotécnica es una herramienta fundamental que permite subdividir el territorio en unidades homogéneas según sus características de suelo y roca, evaluando su aptitud para diferentes usos constructivos y su susceptibilidad a riesgos geológicos (Alonso Pandavenes, 2024). Este tipo de estudios es especialmente relevante en áreas con topografía accidentada y geología diversa, como es el caso de los Andes.

Para llevar a cabo el estudio, se delimitó el área urbana del distrito en cinco zonas representativas: (1) Área Urbana Central, (2) Área de Transición, (3) Área de Ladera, (4) Cayhuayna Alta y (5) Área Urbana Alta. La metodología combinó técnicas de prospección geológica (basadas en la cartografía oficial del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET (Quispesivana Quispe, 1996) con una exploración geotécnica de campo que incluyó la excavación de dieciséis calicatas de hasta tres metros de profundidad. De estas calicatas se extrajeron muestras alteradas e inalteradas, que fueron sometidas a una batería completa de ensayos de laboratorio normalizados según las normas técnicas peruanas (NTP) y las normas ASTM: granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad, gravedad específica, ensayo Proctor modificado, CBR (California Bearing Ratio), consolidación unidimensional, corte directo y triaxial (Das, 2001); (Terzaghi et al., 1996). Todos los ensayos se realizaron en el laboratorio de geotecnia de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Hermilio Valdizán.

Los resultados obtenidos evidencian una heterogeneidad significativa en las propiedades del suelo a lo largo del distrito, lo que justifica plenamente la necesidad de una zonificación detallada. Por ejemplo, en la Zona 1 (centro urbano) predominan las arenas mal graduadas con limo de baja plasticidad (clasificación SUCS SP-ML), que presentan una resistencia moderada pero

cierta susceptibilidad a procesos de erosión e inundación. En la Zona 2 (transición), los suelos son granulares más homogéneos (SP y A-2-4), con buena respuesta a la compactación. La Zona 3 (ladera) muestra suelos bien graduados (SW a SM) de baja compresibilidad, aptos para cimentaciones superficiales. La Zona 4 (Cayhuayna Alta) presenta suelos arcillo-arenosos (SC-SM) con capacidad portante moderada, mientras que la Zona 5 (parte alta) está formada por arenas arcillosas con muy baja capacidad de soporte ($\text{CBR} < 3 \%$) y alta compresibilidad, lo que la hace desfavorable para construcciones de cierta envergadura.

La integración de todos estos datos en un sistema de información geográfica (ArcGIS) ha permitido generar mapas de clasificación de suelos (SUCS y AASHTO), de capacidad de soporte (CBR), de parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción), y de compresibilidad. Estos mapas constituyen el producto final de la investigación y se presentan en el capítulo 7 como una herramienta práctica para la toma de decisiones.

El presente manuscrito está estructurado en ocho capítulos que siguen la secuencia lógica del estudio. El capítulo 1 plantea el problema de investigación, los objetivos y las hipótesis. El capítulo 2 revisa los fundamentos teóricos y los antecedentes nacionales e internacionales en zonificación geotécnica. El capítulo 3 describe la metodología empleada, tanto en campo como en laboratorio. El capítulo 4 presenta los resultados de la prospección geológica y geotécnica de cada zona. El capítulo 5 detalla los resultados de los ensayos de laboratorio por zona. El capítulo 6 analiza e interpreta estos resultados, estableciendo los parámetros de diseño. El capítulo 7 expone los mapas de zonificación. Finalmente, el capítulo 8 recoge las conclusiones y recomendaciones para la práctica profesional y la gestión urbana.

Confiamos en que esta obra sea de utilidad para todos aquellos que tienen la responsabilidad de construir y planificar la ciudad de Pillcomarca, y también

para quienes, en otras regiones andinas, enfrentan desafíos similares. El conocimiento del suelo es el primer paso hacia una construcción segura y un desarrollo sostenible.



PARTE I: CONTEXTO Y FUNDAMENTOS

CAPÍTULO 1. El desafío del crecimiento urbano no planificado en Pillcomarca



1.1 Crecimiento demográfico y ocupación del suelo sin estudios previos

El distrito de Pillcomarca, ubicado en la provincia de Huánuco, en el corazón de la sierra central del Perú, ha experimentado en las últimas décadas un fenómeno demográfico de gran magnitud. Según los datos de los censos nacionales del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2018), la

población del distrito pasó de 23 896 habitantes en 2007 a más de 43 000 en 2017, lo que representa un incremento superior al 80 % en apenas diez años. Este crecimiento explosivo, uno de los más altos del departamento, ha sido impulsado principalmente por procesos migratorios desde las zonas rurales hacia el ámbito urbano, en busca de mejores oportunidades educativas, laborales y de servicios.

Este rápido incremento poblacional ha generado una demanda masiva de vivienda que el mercado formal y los planes urbanos no han logrado satisfacer. Como consecuencia, se ha producido una ocupación acelerada y mayoritariamente desordenada de terrenos periféricos, muchos de ellos ubicados en laderas de fuerte pendiente, áreas de relleno o zonas de riesgo geológico. Este patrón de crecimiento, común en muchas ciudades intermedias de los Andes peruanos, se caracteriza por la ausencia de planificación técnica y por la limitada capacidad de los gobiernos locales para regular y orientar la expansión urbana (Butrón Quispe, 2015); (Vilela & Moschela, 2017).

El problema se agrava por las condiciones económicas de la población. La mayoría de las nuevas viviendas han sido construidas mediante procesos de autoconstrucción, sin la participación de profesionales capacitados y sin la realización de estudios geotécnicos previos que permitan conocer las características del suelo de fundación. Según diversos estudios, en el Perú más del 70 % de las viviendas son de carácter informal y han sido construidas sin asistencia técnica especializada, lo que las hace especialmente vulnerables ante eventos sísmicos o condiciones climáticas extremas (Calderón Paniagua et al., 2026); (Burga Hernández & Macuri Templadera, 2024).

Esta situación contraviene lo establecido en el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, particularmente en la Norma Técnica E.050 «Suelos y Cimentaciones», que exige la realización de estudios de mecánica de suelos como requisito indispensable para el diseño de cualquier edificación (MVCS,

2021). La norma establece que «el objetivo de la presente Norma es establecer los requisitos para la ejecución de estudios de mecánica de suelos con fines de cimentación, a fin de asegurar la [...] estabilidad de las edificaciones». Sin embargo, en la práctica, esta exigencia no se cumple en la mayoría de las construcciones informales, y muchas veces ni siquiera en proyectos formales de menor envergadura.

La falta de información geotécnica confiable sobre el subsuelo del distrito ha impedido a las autoridades y a los profesionales del sector contar con una base técnica para la toma de decisiones. Pillcomarca no dispone de una zonificación geotécnica y geológica integral que sirva como herramienta para la planificación urbana y el diseño de cimentaciones. Este vacío de información limita la capacidad para identificar zonas con riesgos potenciales, lo que incrementa la probabilidad de asentamientos diferenciales, fallas estructurales y procesos de inestabilidad del terreno.

1.2 Consecuencias en la seguridad de las edificaciones

La ausencia de estudios geotécnicos en el proceso constructivo tiene consecuencias directas y graves para la seguridad de las edificaciones y, por ende, para la vida de las personas. El comportamiento del suelo frente a las cargas estructurales, su capacidad de carga, su resistencia al corte, su compresibilidad y su respuesta ante cambios de humedad resultan determinantes para la estabilidad de cualquier construcción (Das, 2001); (Terzaghi et al., 1996).

En suelos con deficientes propiedades mecánicas, como aquellos con alto contenido de arcillas o limos, es necesario realizar ensayos geotécnicos con especial énfasis debido a su alta susceptibilidad a deformaciones significativas (García León, 2022). En el caso de Pillcomarca, la heterogeneidad de los suelos que van desde depósitos aluviales arenosos en las zonas bajas hasta suelos

arcillosos en las laderas altas hace que el comportamiento del terreno varíe considerablemente de un sector a otro, lo que exige un conocimiento detallado para cada tipo de edificación.

Las consecuencias más frecuentes de la falta de este conocimiento son:

Asentamientos diferenciales. Cuando el suelo no tiene una capacidad de carga uniforme o cuando no se ha compactado adecuadamente, las edificaciones pueden experimentar hundimientos desiguales en diferentes puntos de su cimentación. Estos asentamientos diferenciales se manifiestan en forma de grietas en muros, desplomes de columnas, desniveles en pisos y, en casos extremos, colapso estructural.

Fallas por corte del suelo. Si la resistencia al esfuerzo cortante del suelo es insuficiente para soportar las cargas transmitidas por la cimentación, puede producirse una falla por capacidad de carga, lo que resulta en el hundimiento brusco de la edificación. Este tipo de falla es especialmente peligroso porque ocurre de manera repentina y sin previo aviso.

Inestabilidad de taludes. En las zonas de ladera, donde la pendiente del terreno es pronunciada, la construcción sin estudios geotécnicos aumenta el riesgo de deslizamientos y movimientos en masa. La saturación del suelo por lluvias intensas, combinada con la sobrecarga de las edificaciones y la falta de sistemas de drenaje adecuados, puede desencadenar la remoción de grandes volúmenes de tierra.

Problemas de consolidación. En suelos finos y compresibles, como las arcillas, la aplicación de cargas estructurales genera un proceso de consolidación lento que produce asentamientos progresivos a lo largo del tiempo. Sin un estudio de consolidación que permita predecir la magnitud y la velocidad de estos asentamientos, las edificaciones pueden sufrir daños acumulativos que comprometan su integridad.

Estos fenómenos ya se han manifestado en diversos sectores del distrito de Pillcomarca, donde se han observado desplazamientos diferenciales, grietas en viviendas y, en algunos casos, colapsos de elementos estructurales. La recurrencia de estos problemas evidencia la urgencia de contar con información geotécnica confiable que permita orientar las decisiones de diseño y construcción.

1.3 Preguntas que orientan la investigación y objetivos propuestos

Frente al problema descrito, la presente investigación se planteó como una respuesta integral orientada a generar conocimiento aplicable sobre las características del suelo en el área urbana de Pillcomarca. Las preguntas que guiaron el estudio fueron las siguientes:

Pregunta general: ¿De qué manera el análisis de las propiedades físicas, mecánicas y geológicas de los suelos permite realizar una zonificación geotécnica y geológica integral del distrito de Pillcomarca, Huánuco?

Preguntas específicas:

- ¿Cómo influyen los resultados de los ensayos de granulometría y límites de consistencia en la clasificación geotécnica de los suelos del distrito?
- ¿De qué manera el ensayo Proctor y el ensayo CBR permiten determinar la densidad máxima seca, el contenido óptimo de humedad y la capacidad de soporte de los suelos?
- ¿Cómo contribuyen los ensayos de corte directo y triaxial a la determinación de los parámetros de resistencia al corte, cohesión y ángulo de fricción de los suelos?

- ¿De qué manera el ensayo de consolidación unidimensional permite evaluar la compresibilidad y los asentamientos de los suelos?
- ¿Cómo se integran las características físico-mecánicas y geológicas del suelo en la elaboración de un mapa de zonificación geotécnica y geológica representativo del distrito?

A partir de estas preguntas, se formularon los siguientes objetivos:

Objetivo general: Determinar la zonificación geotécnica y geológica del distrito de Pillcomarca mediante el análisis de las propiedades físicas, mecánicas y geológicas de los suelos, con la finalidad de contribuir a una adecuada planificación urbana y al diseño de cimentaciones seguras.

Objetivos específicos:

- 1) Realizar ensayos de granulometría y límites de consistencia para clasificar los suelos del distrito de Pillcomarca según los sistemas SUCS y AASHTO.
- 2) Determinar la densidad máxima seca, el contenido óptimo de humedad y la capacidad de soporte del suelo mediante los ensayos Proctor y CBR.
- 3) Evaluar los parámetros de resistencia al corte, cohesión y ángulo de fricción de los suelos a través de los ensayos de corte directo y triaxial.
- 4) Analizar el comportamiento del suelo frente a cargas verticales mediante el ensayo de consolidación unidimensional.
- 5) Integrar los resultados físico-mecánicos y geológicos del suelo para elaborar el mapa de zonificación geotécnica y geológica del distrito de Pillcomarca.

1.4 Hipótesis y variables de estudio

Con base en el marco conceptual y en la experiencia de estudios similares en contextos andinos (Huaman Cusiquispe & Surco Escalante, 2024); (Alvarez Caso & Farfan Huamanga, 2021); (Pasquel Cotrina, 2022), se formularon las siguientes hipótesis:

Hipótesis general: El análisis de las propiedades físicas, mecánicas y geológicas de los suelos permite determinar la zonificación geotécnica y geológica del distrito de Pillcomarca.

Hipótesis específicas:

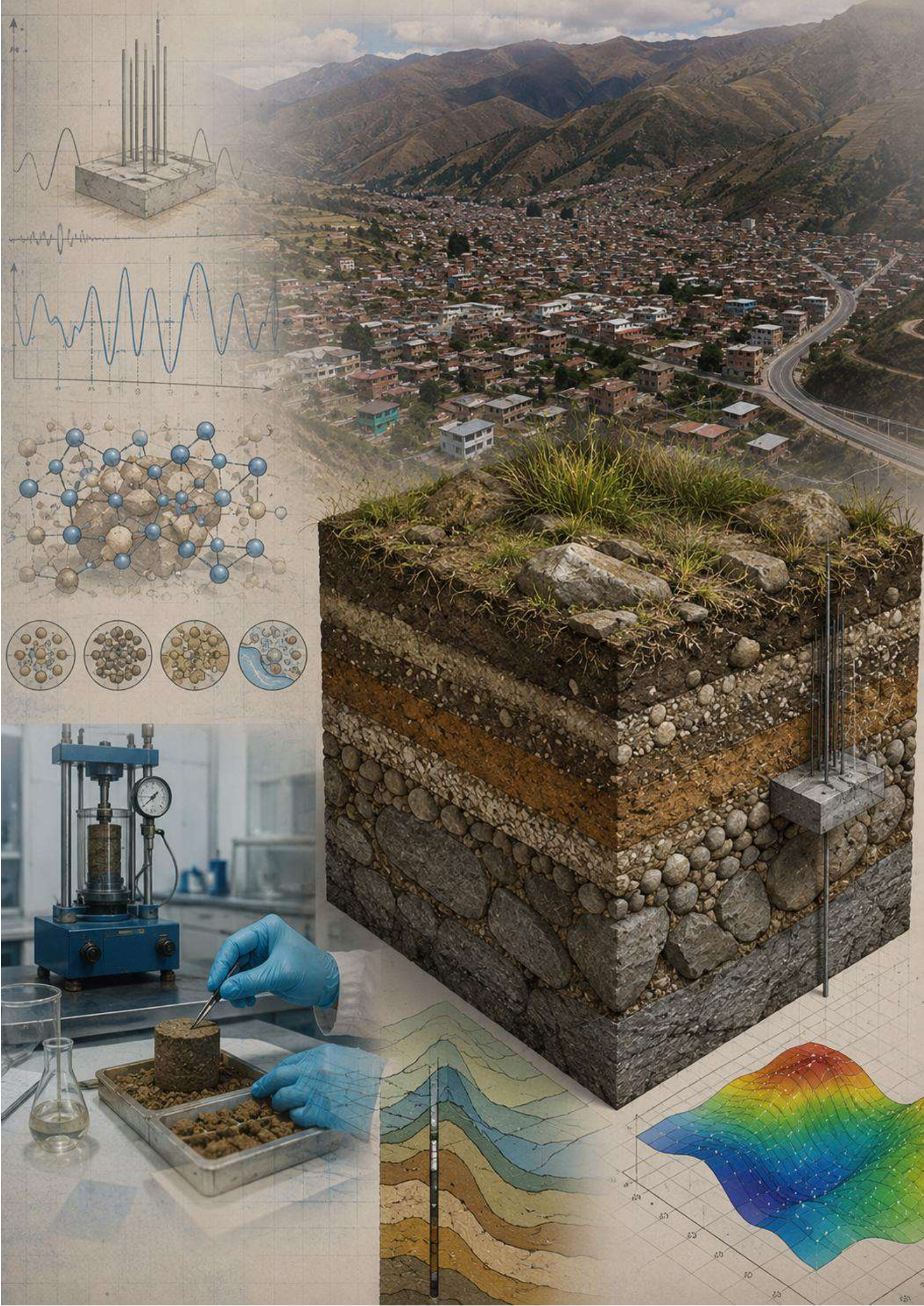
- Los ensayos de granulometría y límites de consistencia permiten determinar la clasificación geotécnica de los suelos del distrito de Pillcomarca.
- El ensayo de consolidación unidimensional permite evaluar el comportamiento del suelo frente a cargas verticales y su influencia en los asentamientos.
- El ensayo de corte directo permite determinar los parámetros de cohesión y ángulo de fricción de los suelos.
- El ensayo triaxial permite analizar los parámetros geotécnicos de cohesión y ángulo de fricción de los suelos.
- El ensayo CBR permite determinar la energía de compactación necesaria para alcanzar la máxima densidad seca de los suelos.
- El análisis de la información geotécnica mediante software ArcGIS permite elaborar el mapa de zonificación geotécnica y geológica de los suelos del distrito.

Variables de estudio:

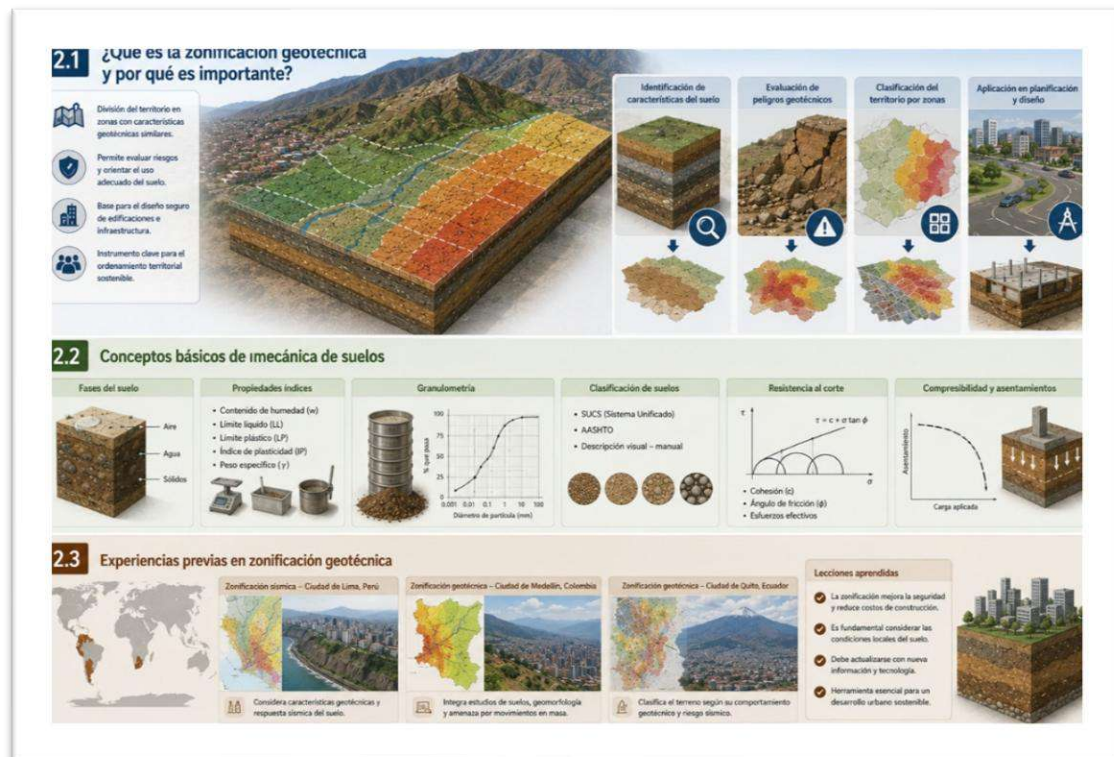
La investigación se organizó en torno a dos grandes variables:

- **Variable independiente:** Propiedades físicas, mecánicas y geológicas de los suelos del distrito de Pillcomarca. Esta variable incluye dimensiones como la granulometría, los límites de consistencia, el contenido de humedad, la densidad, la resistencia al corte, la compresibilidad y la capacidad de soporte.
- **Variable dependiente:** Zonificación geotécnica y geológica de los suelos del distrito de Pillcomarca. Esta variable se operacionaliza a través de la clasificación de suelos según los sistemas SUCS y AASHTO, la capacidad de carga, los parámetros de resistencia y la representación cartográfica mediante mapas temáticos.

El estudio partió del supuesto de que existe una relación directa entre las propiedades del suelo y su aptitud para fines constructivos, y que la caracterización sistemática de estas propiedades permite establecer una zonificación confiable que sirva como herramienta de planificación territorial.



CAPÍTULO 2. Bases teóricas para entender el suelo y su comportamiento



2.1 ¿Qué es la zonificación geotécnica y por qué es importante?

Cuando se planifica una ciudad, se diseñan sus calles, sus parques y la ubicación de sus edificios, normalmente se piensa en lo que se ve: el relieve, la vegetación, el trazado urbano. Sin embargo, lo que ocurre bajo la superficie es igualmente determinante. El suelo sobre el que se asienta una ciudad no es uniforme; presenta variaciones en su composición, resistencia y comportamiento que pueden marcar la diferencia entre una construcción segura y una vulnerable ante movimientos sísmicos o lluvias intensas.

La zonificación geotécnica es precisamente la herramienta que permite conocer y organizar esa información subterránea. Consiste en la subdivisión de

un territorio en unidades homogéneas según sus características geológicas y geotécnicas (Alonso Pandavenes, 2024). En otras palabras, es un mapa que clasifica el suelo de una ciudad o distrito en zonas con propiedades similares, indicando su aptitud para diferentes usos constructivos y su susceptibilidad a riesgos como deslizamientos, inundaciones o asentamientos diferenciales.

La importancia de esta herramienta radica en varios aspectos fundamentales:

- **Prevención de riesgos.** La zonificación geotécnica permite identificar áreas con peligros geológicos activos como laderas inestables, zonas inundables o suelos licuables antes de que se construya sobre ellas. Esto convierte a los mapas geotécnicos en instrumentos de gestión del riesgo, ya que orientan la ocupación del territorio hacia zonas seguras y desalientan la construcción en áreas peligrosas.
- **Diseño de cimentaciones adecuadas.** Conocer el tipo de suelo que se tiene en cada zona permite a los ingenieros diseñar cimentaciones acordes a las condiciones del terreno. No es lo mismo construir sobre una roca sólida que sobre una arena suelta o una arcilla compresible. La zonificación proporciona los parámetros necesarios: capacidad portante, resistencia al corte, compresibilidad para dimensionar zapatas, losas o pilotes de manera eficiente y segura.
- **Planificación urbana informada.** Las autoridades municipales pueden utilizar los mapas de zonificación geotécnica para orientar el crecimiento urbano, definir usos de suelo y establecer normativas constructivas acordes a las condiciones del terreno. Esto es especialmente relevante en contextos como el de Pillcomarca, donde el crecimiento urbano ha sido acelerado y desordenado.
- **Ahorro económico y sostenibilidad.** Construir sobre un suelo inadecuado sin los refuerzos necesarios puede generar costos elevados por

reparaciones, refuerzos estructurales o incluso demoliciones. La zonificación permite anticipar estos problemas y tomar decisiones que optimicen los recursos.

En el contexto de la presente investigación, la zonificación geotécnica constituye el producto final del análisis de las propiedades físicas y mecánicas del suelo en el distrito de Pillcomarca. No se trata de un ejercicio académico, sino de una herramienta práctica para la planificación urbana y el diseño seguro de cimentaciones.

2.2 Conceptos básicos de mecánica de suelos

Para comprender la zonificación geotécnica, es necesario conocer algunos conceptos fundamentales de la mecánica de suelos. Esta disciplina de la ingeniería civil estudia el comportamiento del suelo cuando es sometido a cargas, cambios de humedad y otras condiciones ambientales. A continuación, se presentan los conceptos más relevantes para el estudio de Pillcomarca.

2.2.1 Granulometría: la distribución de tamaños de las partículas

El suelo está compuesto por partículas de diferentes tamaños: desde grandes bloques de roca hasta partículas microscópicas de arcilla. La granulometría es el análisis que determina qué proporción de cada tamaño está presente en una muestra de suelo. Este análisis se realiza mediante dos métodos principales:

- Tamizado: para partículas mayores a 0.075 mm (gravas y arenas), se hace pasar el suelo por una serie de tamices de malla cada vez más fina, y se pesa el material retenido en cada uno.

- **Sedimentación:** para partículas menores a 0.075 mm (limos y arcillas), se utiliza el método del hidrómetro o la pipeta, que mide la velocidad de caída de las partículas en una suspensión acuosa.

La curva granulométrica que se obtiene de este análisis permite clasificar el suelo y anticipar su comportamiento. Una mayor proporción de arenas y gravas suele asociarse con una mayor capacidad portante y mejores condiciones de drenaje. Por el contrario, un alto contenido de arcillas y limos implica mayor retención de agua y menor resistencia mecánica (Villalobos Jara, 2016).

2.2.2 Límites de Atterberg: la consistencia del suelo

Los límites de Atterberg son contenidos de humedad que marcan las fronteras entre los diferentes estados de consistencia de un suelo fino (arcillas y limos). Fueron definidos por el científico sueco Albert Atterberg a principios del siglo XX y son fundamentales para clasificar los suelos y predecir su comportamiento. Los tres límites principales son:

- **Límite líquido (LL):** es el contenido de humedad en el cual el suelo pasa del estado plástico al estado líquido. Se determina con el aparato de Casagrande, que mide el número de golpes necesarios para que una ranura practicada en una pasta de suelo se cierre. El límite líquido corresponde al contenido de humedad para el cual el cierre ocurre a los 25 golpes (Das, 2001). Un LL alto indica que el suelo tiene mayor capacidad de retención de agua y es más susceptible a cambios volumétricos.
- **Límite plástico (LP):** es el contenido de humedad en el cual el suelo comienza a fracturarse al ser moldeado en cilindros de 3.2 mm de diámetro. Representa el límite inferior del estado plástico (Terzaghi,

1995). Por debajo de este valor, el suelo se comporta como un sólido quebradizo.

- **Índice de plasticidad (IP):** es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ($IP = LL - LP$). Este valor indica el rango de humedades en el que el suelo se comporta de manera plástica, es decir, puede deformarse sin fracturarse. Un IP alto indica un suelo muy plástico, típicamente arcilloso, mientras que un IP bajo corresponde a suelos poco plásticos o no plásticos, como los limos o las arenas.

En el estudio de Pillcomarca, los límites de Atterberg permitieron clasificar los suelos y evaluar su potencial expansivo y su compresibilidad.

2.2.3 Compactación: densidad y humedad óptimas

La compactación es el proceso mecánico mediante el cual se aumenta la densidad del suelo, reduciendo el volumen de vacíos y mejorando su resistencia y estabilidad. En laboratorio, la compactación se simula mediante el ensayo Proctor modificado, que determina dos parámetros fundamentales:

- **Densidad seca máxima (γ_d máx):** es el peso del suelo seco por unidad de volumen que se alcanza cuando el suelo es compactado con una energía específica.
- **Contenido de humedad óptimo (OCH):** es la humedad a la que se alcanza la densidad seca máxima.

La curva de compactación muestra que, al aumentar el contenido de humedad, la densidad seca aumenta hasta un punto máximo (el óptimo) y luego disminuye. Esto ocurre porque el agua actúa como lubricante que permite reordenar las partículas; pero, cuando hay demasiada agua, ocupa espacio que debería ser ocupado por partículas sólidas, reduciendo la densidad.

En la práctica, estos parámetros son esenciales para controlar la compactación de terraplenes, subrasantes de carreteras y rellenos, garantizando que el suelo alcance la resistencia y estabilidad requeridas.

2.2.4 Capacidad de soporte: el ensayo CBR

El CBR (California Bearing Ratio) es un ensayo empírico que mide la capacidad de soporte de un suelo compactado. Se utiliza ampliamente en el diseño de pavimentos y en la evaluación de subrasantes.

El ensayo consiste en hacer penetrar un pistón normalizado en una muestra de suelo compactada a una velocidad constante de 1.27 mm/min, y medir la carga necesaria para lograr ciertas penetraciones (0.1 y 0.2 pulgadas). El CBR se expresa como el porcentaje de la carga requerida para penetrar el suelo en relación con la carga estándar requerida para penetrar una grava triturada de referencia (Bowles, 1992).

Un CBR alto indica un suelo con buena capacidad de soporte, adecuado para soportar cargas de tránsito o estructurales. Un CBR bajo, por el contrario, indica que el suelo es débil y requerirá mejoras o espesores mayores en las capas de pavimento.

En la investigación de Pillcomarca, el CBR permitió evaluar la aptitud de los suelos para soportar cargas y orientar el diseño de cimentaciones y obras viales.

2.2.5 Resistencia al corte: cohesión y ángulo de fricción

La resistencia al corte es la capacidad del suelo para resistir esfuerzos que tienden a producir deslizamiento entre sus partículas. Es el parámetro más

importante para evaluar la estabilidad de taludes, la capacidad portante de cimentaciones y el empuje sobre muros de contención.

El criterio de falla de Mohr-Coulomb describe la resistencia al corte del suelo mediante la ecuación:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi)$$

donde:

- τ es el esfuerzo cortante en el momento de la falla.
- c es la cohesión del suelo, es decir, la resistencia que proviene de las fuerzas de atracción entre partículas (especialmente relevante en arcillas).
- σ es el esfuerzo normal aplicado sobre el plano de corte.
- φ es el ángulo de fricción interna, que refleja la resistencia por rozamiento entre partículas (más importante en arenas y gravas).

Para determinar estos parámetros, se utilizan dos ensayos principales:

- Ensayo de corte directo: una muestra de suelo se coloca en una caja de corte dividida en dos mitades. Se aplica una carga normal constante y luego se incrementa el esfuerzo cortante hasta provocar la falla. Es un ensayo relativamente sencillo y rápido, aunque presenta limitaciones en la distribución de deformaciones (Craig & Knappett, 2012).
- Ensayo triaxial: una muestra cilíndrica de suelo se coloca dentro de una cámara de presión y se somete a un esfuerzo de confinamiento (σ_3) mientras se incrementa el esfuerzo axial (σ_1) hasta la falla. Permite reproducir condiciones tridimensionales y obtener parámetros más precisos (Guerra Torralbo, 2017).

En el estudio de Pillcomarca, estos ensayos permitieron determinar los parámetros de resistencia al corte de los suelos, fundamentales para el diseño de cimentaciones y la evaluación de estabilidad.

2.2.6 Consolidación: el asentamiento dependiente del tiempo

La consolidación es el proceso por el cual un suelo saturado reduce su volumen al ser sometido a una carga constante, debido a la expulsión gradual del agua de sus poros (Das, 2001). Este fenómeno es especialmente relevante en suelos finos (arcillas y limos), que tienen baja permeabilidad y requieren tiempos prolongados para drenar.

El ensayo de consolidación unidimensional (oedométrico) consiste en colocar una muestra de suelo en un anillo, aplicar cargas crecientes y medir la deformación en función del tiempo. Los parámetros más importantes que se obtienen son:

- **Índice de compresibilidad (C_c):** indica la magnitud del asentamiento que experimentará el suelo ante un incremento de carga. Un C_c alto significa que el suelo es muy compresible.
- **Carga de preconsolidación (σ'_p):** es la máxima presión efectiva que el suelo ha soportado en su historia geológica. Si la carga aplicada es menor que la carga de preconsolidación, el asentamiento será pequeño; si es mayor, el asentamiento será significativo.
- **Coeficiente de consolidación (C_v):** indica la velocidad a la que se disipa el exceso de presión de poros y, por tanto, la rapidez del asentamiento.

En el contexto de Pillcomarca, el análisis de consolidación permite predecir los asentamientos que experimentarán las edificaciones a lo largo del tiempo, especialmente en zonas con suelos finos.

2.3 Experiencias previas en zonificación geotécnica

La zonificación geotécnica no es un concepto nuevo. En las últimas décadas, numerosos estudios en diferentes partes del mundo han demostrado su utilidad para la planificación urbana y la reducción de riesgos. A continuación, se presentan algunos antecedentes relevantes, organizados por ámbito geográfico.

2.3.1 Antecedentes internacionales

(Vincent & Mallo, 2023) investigaron las condiciones del subsuelo en la región central norte de Yelwa, Nigeria, con fines de evaluación para la construcción de infraestructuras. Los resultados mostraron que el contenido de humedad natural del suelo varió entre 8.48% y 25.77%, y el índice de plasticidad osciló entre 7.63% y 24.77%. Los ensayos de corte directo arrojaron valores de cohesión entre 13 y 24 kN/m² y ángulos de fricción interna entre 12° y 16°. El estudio concluyó que el subsuelo de la zona presenta condiciones geotécnicas que varían de regulares a deficientes, resaltando la importancia de una adecuada caracterización para garantizar la seguridad de las infraestructuras.

(Palacio-Pacheco et al., 2021) desarrollaron una zonificación geotécnica de la ciudad de Valledupar, Colombia, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG). Los resultados indicaron que los suelos predominantes corresponden a las clasificaciones SC, SM, GW, GP-GM, SP-SM y SC-SM, compuestos principalmente por arenas, gravas y limos. Estos suelos presentan una elevada capacidad portante y un comportamiento

mecánico favorable para soportar edificaciones. El estudio identificó que el nivel freático se encuentra a una profundidad promedio de 1.2 m en sectores específicos, lo que representa una limitante para edificaciones de gran altura. Los autores destacaron el uso del SIG como una herramienta eficaz para la zonificación geotécnica.

(Masís-Flores, 2017) evaluó las propiedades geotécnicas del suelo en el campus del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Los resultados mostraron que el contenido de humedad del suelo varió entre 17% y 58%, influyendo directamente en la presión de poros y en la reducción de los esfuerzos efectivos. El nivel freático se encontró a una profundidad promedio de 2.25 m en las zonas elevadas y de 3.60 m en las áreas bajas, lo que sugiere la posibilidad de asentamientos diferenciales en estructuras construidas sobre estos suelos.

2.3.2 Antecedentes nacionales

(Huaman Cusiquispe & Surco Escalante, 2024) desarrollaron un estudio de zonificación geológica–geotécnica para la expansión urbana del centro poblado de Huasao, en el distrito de Oropesa, Cusco. Los resultados evidenciaron que la Zona I, conformada por depósitos aluviales bien consolidados, presenta una capacidad portante entre 1.5 y 1.75 kg/cm², adecuada para edificaciones de hasta cuatro niveles. En contraste, la Zona V, ubicada en las inmediaciones del bofedal de Huasao, presentó las condiciones más desfavorables, con un nivel freático superficial (0.5–1.0 m) y suelos orgánicos con capacidad portante inferior a 0.5 kg/cm². El estudio identificó las Zonas I y II como las más aptas para el desarrollo urbano.

(Alvarez Caso & Farfan Huamanga, 2021) elaboraron un mapa de zonificación geotécnica para la localidad de Lamay, en la provincia de Calca, Cusco. Los resultados permitieron diferenciar tres zonas: la Zona I, con suelos

arcillosos de baja resistencia (capacidad de carga $0.89\text{--}1.01\text{ kg/cm}^2$); la Zona II, con suelos arenosos de resistencia media ($1.01\text{--}1.09\text{ kg/cm}^2$); y la Zona III, con suelos de gravas bien graduadas ($1.09\text{--}1.17\text{ kg/cm}^2$). Los autores concluyeron que estos resultados son fundamentales para asegurar que las futuras edificaciones cuenten con cimentaciones adecuadas, promoviendo una expansión urbana segura y sostenible.

(Astocondor Peñarrieta, 2020) realizó una evaluación detallada de las propiedades geotécnicas de los suelos del sector Pómape, en el distrito de Monsefú, Chiclayo. Los resultados indicaron que el contenido de humedad del suelo varía desde 11.14% en los estratos más secos hasta 28.27% en los más húmedos. El análisis granulométrico evidenció que los suelos superficiales presentan un predominio de material fino (75.53%), mientras que en estratos más profundos se incrementa el contenido de arenas y gravas. Los ensayos de corte directo mostraron ángulos de fricción entre 11.16° y 16.12° , y cohesiones entre 0.12 y 0.15 kg/cm^2 . El estudio concluyó que la zonificación geotécnica constituye una herramienta fundamental para la planificación urbana del sector.

2.3.3 Antecedentes locales

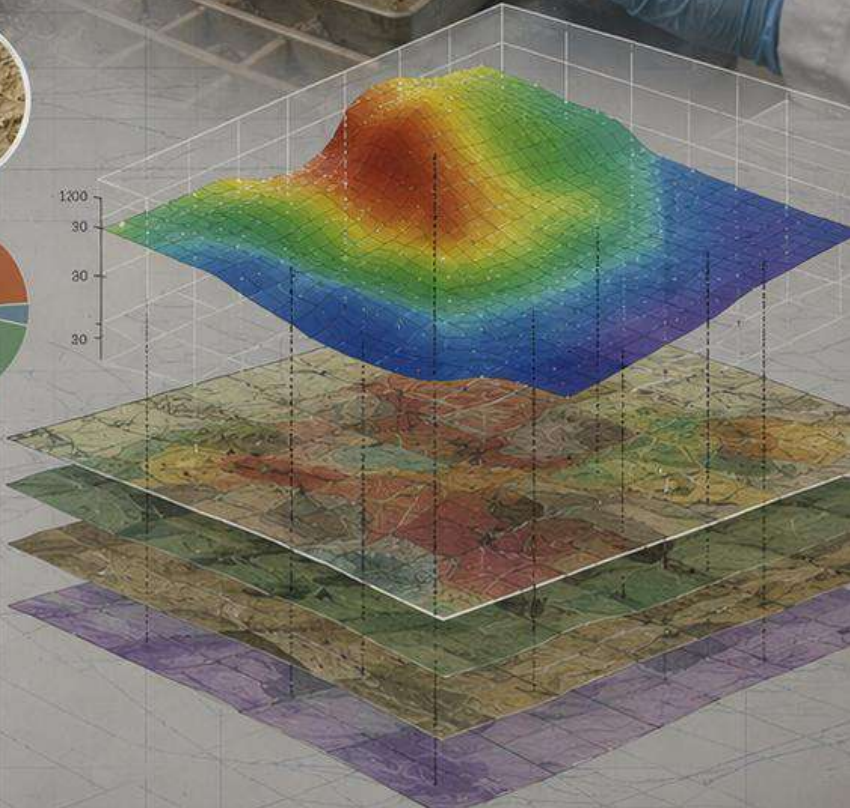
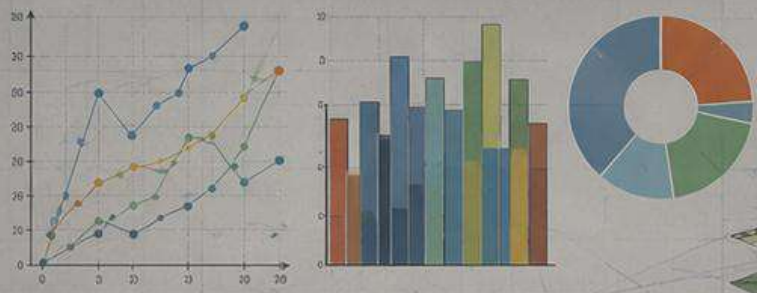
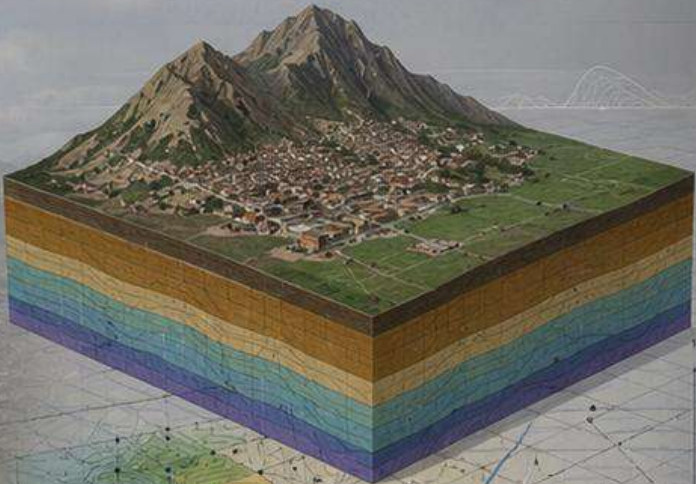
(Pasquel Cotrina, 2022) realizó una zonificación geotécnica para el diseño de cimentaciones de viviendas unifamiliares de hasta tres pisos en el centro poblado Quicacán. El estudio identificó tres zonas geotécnicas diferenciadas. En la Zona I predominó arena arcillosa (SC), con capacidad portante admisible entre 4.36 y 6.05 kgf/cm^2 y asentamientos estimados entre 0.5 y 1.2 cm . La Zona II estuvo conformada por arena limosa (SM), presentando las mejores condiciones geotécnicas, con capacidades admisibles entre 6.45 y 8.03 kgf/cm^2 . En la Zona III se identificó nuevamente arena arcillosa (SC), con capacidad admisible entre 4.36 y 6.01 kgf/cm^2 . El estudio concluyó que la zonificación

geotécnica permitió definir dimensiones adecuadas de zapatas, garantizando la estabilidad de las cimentaciones.

2.3.4 Lecciones aprendidas para Pillcomarca

Los antecedentes presentados ofrecen lecciones valiosas para el estudio de Pillcomarca:

- La heterogeneidad es la norma: tanto en Nigeria como en Valledupar, Lamay y Huasao, los suelos varían significativamente dentro de áreas relativamente pequeñas. Esto refuerza la necesidad de una zonificación detallada que reconozca y mapee esas diferencias.
- La capacidad portante es el parámetro clave: todos los estudios coinciden en que la capacidad portante es el factor determinante para la aptitud constructiva. Su evaluación mediante ensayos de laboratorio (CBR, corte directo, consolidación) es indispensable.
- El nivel freático y la humedad son factores críticos: la presencia de agua en el suelo reduce significativamente su resistencia y aumenta su compresibilidad. En Pillcomarca, el control del drenaje y la humedad será esencial para la seguridad de las construcciones.
- La zonificación es una herramienta de gestión: más allá de los datos técnicos, los mapas de zonificación geotécnica son instrumentos para la toma de decisiones urbanas. Su utilidad depende de que sean adoptados por las autoridades y los profesionales del sector.
- La metodología SIG es eficaz: el uso de sistemas de información geográfica permite integrar y visualizar grandes volúmenes de datos, facilitando la elaboración de mapas temáticos y la comunicación de resultados.



PARTE II: METODOLOGÍA Y EXPLORACIÓN DE CAMPO

CAPÍTULO 3. Cómo se realizó el estudio



3.1 Área de estudio: ubicación y características

La investigación se desarrolló en la zona urbana del distrito de Pillcomarca, ubicado en la provincia de Huánuco, en el departamento de Huánuco, Perú. Este distrito se encuentra en la sierra central del país, en el flanco oriental de la Cordillera Oriental de los Andes peruanos, en una zona de transición hacia la región sub-andina.

La selección de esta área no fue casual. Pillcomarca ha experimentado un crecimiento urbano acelerado en las últimas décadas, con un incremento poblacional superior al 80 % entre 2007 y 2017 (INEI, 2018), lo que ha generado una ocupación desordenada del territorio sin los estudios técnicos previos necesarios. Esta situación ha motivado la necesidad de contar con una zonificación geotécnica y geológica que sirva como herramienta para la planificación urbana y el diseño seguro de cimentaciones.

El área de estudio fue delimitada en cinco zonas representativas, seleccionadas en función de su morfología, tipo de ocupación urbana y características geológicas:

- Zona 1 – Área Urbana Central: Corresponde al núcleo urbano consolidado, con pendientes suaves y predominio de depósitos aluviales.
- Zona 2 – Área de Transición: Ubicada entre el valle y las laderas, presenta suelos de origen fluvio-coluvial.
- Zona 3 – Área de Ladera: Caracterizada por pendientes pronunciadas y presencia de rocas intrusivas.
- Zona 4 – Cayhuayna Alta: Sector elevado con depósitos aluviales sobre roca intrusiva.
- Zona 5 – Área Urbana Alta: Parte más elevada del distrito, con suelos coluvio-aluviales y presencia de arcillas.

El ámbito temporal del estudio correspondió al año 2024, periodo en el cual se realizaron las actividades de campo, los ensayos de laboratorio y el análisis de resultados. El ámbito temático se centró exclusivamente en la caracterización geológica y geotécnica del suelo, sin abordar aspectos hidrológicos o geomorfológicos en profundidad.

3.2 Trabajos de campo: calicatas y muestreo

Para conocer las características del subsuelo, el equipo de investigación realizó una exploración geotécnica de campo que consistió en la excavación de dieciséis calicatas distribuidas estratégicamente en las cinco zonas del área de estudio. Las calicatas son excavaciones a cielo abierto que permiten observar directamente los estratos del suelo, identificar sus características visuales y extraer muestras para su análisis en laboratorio (Terzaghi et al., 1996).

Ubicación de las calicatas

Las calicatas se ubicaron siguiendo criterios de representatividad geotécnica, accesibilidad y seguridad. Se priorizaron sectores que reflejaran las condiciones predominantes del suelo en cada zona, evitando áreas con rellenos antrópicos significativos o con infraestructura subterránea que impidiera la excavación (Coduto et al., 2016).

Zona 1 (Área Urbana Central):

- Calicata principal (C-01): 362120.50 m E; 8899105.30 m N
- Calicata secundaria 1 (C-02): 362250.00 m E; 8899180.00 m N
- Calicata secundaria 2 (C-03): 362080.00 m E; 8899250.00 m N

Zona 2 (Área de Transición):

- Calicata principal (C-04): 362430.75 m E; 8899300.10 m N
- Calicata secundaria 1 (C-05): 362510.00 m E; 8899380.00 m N
- Calicata secundaria 2 (C-06): 362390.00 m E; 8899450.00 m N

Zona 3 (Área de Ladera):

- Calicata principal (C-07): 362759.65 m E; 8899455.23 m N
- Calicata secundaria 1 (C-08): 362517.00 m E; 8899428.00 m N
- Calicata secundaria 2 (C-09): 362746.00 m E; 8899620.00 m N
- Calicata secundaria 3 (C-10): 363029.00 m E; 8899429.00 m N (proyecto de referencia)

Zona 4 (Cayhuayna Alta):

- Calicata principal (C-11): 363180.40 m E; 8899600.80 m N
- Calicata secundaria 1 (C-12): 363050.00 m E; 8899680.00 m N
- Calicata secundaria 2 (C-13): 363260.00 m E; 8899720.00 m N

Zona 5 (Área Urbana Alta):

- Calicata principal (C-14): 363420.60 m E; 8899805.90 m N
- Calicata secundaria 1 (C-15): 363300.00 m E; 8899880.00 m N
- Calicata secundaria 2 (C-16): 363500.00 m E; 8899920.00 m N

Procedimiento de excavación

Las excavaciones se realizaron de forma manual y, en algunos casos, con el apoyo de una retroexcavadora para alcanzar las profundidades requeridas. Las calicatas principales alcanzaron una profundidad de 3 metros, mientras que las secundarias se excavaron hasta 1.5 metros. Las dimensiones típicas fueron de 1 metro de ancho por 1.5 metros de longitud. Durante la excavación, se tomaron las siguientes precauciones:

- 1) **Marcado del área:** Antes de iniciar, se delimitaron con precisión los bordes de la calicata.
- 2) **Identificación de estratos:** Mediante inspección visual, se diferenciaron los distintos niveles de suelo (estratos) y se registraron sus características (color, textura, humedad, compacidad).
- 3) **Extracción de muestras:** De cada estrato identificado, se extrajeron aproximadamente 50 kg de muestra, tanto alterada como inalterada, utilizando palas, picos y bolsas impermeables.
- 4) **Codificación y transporte:** Cada muestra fue codificada para evitar confusiones y transportada al laboratorio de geotecnia de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Hermilio Valdizán.
- 5) **Relleno de calicatas:** Una vez finalizada la extracción, se procedió al relleno de las excavaciones para evitar accidentes.

Criterios de inclusión y exclusión de muestras

Para garantizar la calidad y representatividad de los datos, se establecieron los siguientes criterios:

Criterios de inclusión:

- Suelos ubicados en áreas representativas de las condiciones geotécnicas naturales del distrito.
- Zonas que permitieran la ejecución segura de calicatas.
- Sectores urbanos destinados o proyectados para el desarrollo de infraestructura.

Criterios de exclusión:

- Suelos en áreas significativamente alteradas por actividades humanas (rellenos, vertederos).
- Zonas con presencia de infraestructura subterránea que impidiera la excavación.
- Áreas de alto riesgo geológico donde la excavación representará peligro para el personal.

3.3 Ensayos de laboratorio realizados

Las muestras extraídas en campo fueron sometidas a una batería completa de ensayos de laboratorio, siguiendo los protocolos establecidos por las Normas Técnicas Peruanas (NTP) y las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM). Estos ensayos permitieron determinar las propiedades físicas, mecánicas y de clasificación de los suelos.

3.3.1 Ensayos de identificación y clasificación**Contenido de humedad (NTP 339.127 / ASTM D 2216):**

Este ensayo determina la cantidad de agua presente en el suelo, expresada como porcentaje del peso seco. Se realiza pesando una muestra húmeda, secándola en un horno a 110 ± 5 °C durante 24 horas, y volviéndola a pesar. La diferencia de peso corresponde al agua evaporada. Este parámetro es fundamental porque influye directamente en la resistencia y compresibilidad del suelo.

Granulometría por tamizado (NTP 339.128 / ASTM D 422):

El análisis granulométrico determina la distribución de los tamaños de las partículas del suelo. Para partículas mayores a 0.075 mm, se utiliza un juego de tamices de malla cuadrada (desde 3 pulgadas hasta el tamiz N° 200). La muestra se hace pasar por los tamices, y se pesa el material retenido en cada uno. Esto permite construir la curva granulométrica, que es esencial para clasificar el suelo y predecir su comportamiento mecánico (Das, 2001).

Gravedad específica (NTP 339.131 / ASTM D 854):

La gravedad específica es la relación entre el peso de un volumen dado de partículas sólidas y el peso de igual volumen de agua. Se determina utilizando un picnómetro, que mide el volumen de agua desplazado por una muestra de suelo. Este parámetro es útil para calcular relaciones de vacíos y porosidad.

Límites de Atterberg (NTP 339.129 / ASTM D 4318):

Los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) caracterizan la consistencia de los suelos finos en función de su contenido de humedad.

- Límite líquido (LL): Se determina con el aparato de Casagrande, que mide el número de golpes necesarios para cerrar una ranura en una pasta de suelo. El LL corresponde al contenido de humedad para el cual el cierre ocurre a los 25 golpes.
- Límite plástico (LP): Se determina enrollando una pequeña masa de suelo hasta formar un cilindro de 3.2 mm de diámetro. El LP es el contenido de humedad en el que el cilindro comienza a agrietarse.

- Índice de plasticidad (IP): Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ($IP = LL - LP$), e indica el rango de humedades en el que el suelo se comporta de manera plástica.

Clasificación de suelos (SUCS y AASHTO):

Con base en los resultados de granulometría y límites de Atterberg, los suelos se clasifican según dos sistemas ampliamente utilizados:

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS): Clasifica los suelos en grupos como gravas (G), arenas (S), limos (M) y arcillas (C), con subgrupos que indican graduación y plasticidad.
- Sistema AASHTO: Clasifica los suelos según su aptitud para uso en carreteras y pavimentos, en grupos que van desde A-1 (excelente) hasta A-8 (pobre).

3.3.2 Ensayos de compactación y capacidad de soporte

Ensayo Proctor modificado (NTP 339.141 / ASTM D 1557):

Este ensayo determina la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de un suelo compactado con una energía específica. La muestra se compacta en un molde de dimensiones normalizadas, aplicando golpes con un pisón de caída libre. Se ensayan varias muestras con diferentes contenidos de humedad, y se construye la curva de compactación, de la cual se obtienen dos parámetros fundamentales:

- Densidad seca máxima (γ_d máx): la máxima densidad alcanzable.
- Contenido de humedad óptimo (OCH): la humedad a la que se alcanza esa densidad máxima.

Ensayo CBR (California Bearing Ratio) (NTP 339.153 / ASTM D 1883):

El CBR mide la capacidad de soporte de un suelo compactado. Se aplica una carga sobre un pistón que penetra en una muestra de suelo a velocidad constante, y se registra la carga necesaria para lograr ciertas penetraciones (0.1 y 0.2 pulgadas). El CBR se expresa como el porcentaje de la carga requerida para penetrar el suelo en relación con la carga estándar requerida para penetrar una grava triturada de referencia. Es un parámetro clave para el diseño de pavimentos y subrasantes (Bowles, 1992).

3.3.3 Ensayos de resistencia y deformación**Ensayo de corte directo (NTP 339.171 / ASTM D 3080):**

Este ensayo determina la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, que es la capacidad del suelo para resistir esfuerzos que tienden a producir deslizamiento entre sus partículas. La muestra se coloca en una caja de corte dividida en dos mitades. Se aplica una carga normal constante y luego se incrementa el esfuerzo cortante hasta provocar la falla. Los resultados se expresan mediante el criterio de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, c es la cohesión, σ es el esfuerzo normal y φ es el ángulo de fricción interna. Estos parámetros son esenciales para el diseño de cimentaciones y la estabilidad de taludes.

Ensayo de consolidación unidimensional (NTP 339.154 / ASTM D 2435):

Este ensayo evalúa la compresibilidad del suelo y su comportamiento frente a cargas sostenidas en el tiempo. La muestra se coloca en un anillo dentro del consolidómetro y se somete a incrementos de carga progresivos (por ejemplo, 1, 2, 4 y 8 kg/cm²). Se registra la deformación en función del tiempo para cada incremento. Los parámetros obtenidos incluyen:

- Índice de compresibilidad (C_c): indica la magnitud del asentamiento.
- Carga de preconsolidación (σ'_p): la máxima presión que el suelo ha soportado en su historia.
- Coeficiente de consolidación (C_v): indica la velocidad del asentamiento.

Ensayo triaxial (NTP 339.166 / ASTM D 2850):

El ensayo triaxial es el método más completo para determinar la resistencia al corte del suelo bajo condiciones de esfuerzo tridimensional. La muestra cilíndrica se coloca dentro de una cámara de presión y se somete a un esfuerzo de confinamiento (σ_3) mientras se incrementa el esfuerzo axial (σ_1) hasta la falla. Permite obtener parámetros de cohesión y ángulo de fricción en condiciones drenadas o no drenadas. En este estudio, se utilizó el ensayo triaxial consolidado-drenado (CD), recomendado para suelos granulares.

3.3.4 Normas técnicas aplicadas

Para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados, todos los ensayos se ejecutaron siguiendo las normas técnicas correspondientes:

Ensayo	Norma Nacional	Norma Internacional
Contenido de Humedad	NTP 339.127	ASTM D 2216
Análisis Granulométrico	NTP 339.128	ASTM D 422
Gravedad Específica	NTP 339.131	ASTM D 854
Límites de Atterberg	NTP 339.129	ASTM D 4318
Clasificación SUCS	NTP 339.134	ASTM D 2487
Clasificación AASHTO	NTP 339.135	ASTM D 2487
Proctor Modificado	NTP 339.141	ASTM D 1557
CBR	NTP 339.153	ASTM D 1883
Consolidación	NTP 339.154	ASTM D 2435
Corte Directo	NTP 339.171	ASTM D 3080
Triaxial	NTP 339.166	ASTM D 2850

Fuente: (INACAL - Instituto Nacional de Calidad, 2019), (INACAL, 2019), (American Society for Testing and Materials (ASTM), n.d.)

3.4 Procesamiento de datos y elaboración de mapas

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio, se procedió al procesamiento y análisis de los datos para convertirlos en información útil para la toma de decisiones. Este proceso incluyó varias etapas:

3.4.1 Organización y análisis de datos

Los datos de los ensayos de laboratorio (granulometría, límites de Atterberg, Proctor, CBR, corte directo, consolidación, triaxial) se organizaron en tablas y gráficos utilizando Microsoft Excel. Este software permitió:

- Calcular parámetros derivados (coeficientes de uniformidad y curvatura, índices de plasticidad, densidades secas máximas, etc.).
- Generar curvas granulométricas, curvas de compactación, curvas esfuerzo-deformación y envolventes de falla.
- Realizar análisis estadísticos básicos y comparar resultados entre zonas.

3.4.2 Clasificación de suelos y determinación de parámetros

Con base en los ensayos de identificación, se clasificaron los suelos de cada calicata y estrato según los sistemas SUCS y AASHTO. Además, se determinaron los siguientes parámetros geotécnicos de diseño para cada zona:

- Capacidad portante admisible: estimada a partir de los ensayos CBR y de las teorías de capacidad de carga (Terzaghi).
- Parámetros de resistencia al corte: cohesión (c) y ángulo de fricción interna (φ), a partir de los ensayos de corte directo y triaxial.
- Parámetros de compresibilidad: índice de compresibilidad (C_c) y carga de preconsolidación (σ'_p), a partir de los ensayos de consolidación.
- Parámetros de compactación: densidad seca máxima (γ_d máx) y contenido de humedad óptimo (OCH), a partir de los ensayos Proctor.

3.4.3 Elaboración de mapas de zonificación

La información geotécnica, junto con los datos de ubicación de las calicatas (coordenadas UTM), se integró en un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando el software ArcGIS. Este proceso permitió:

- 1) **Crear una base de datos geoespacial:** con las ubicaciones de las calicatas y los resultados de los ensayos asociados.

- 2) **Generar mapas temáticos:** mediante técnicas de interpolación espacial (como el método de inverso de la distancia o kriging), se elaboraron mapas que representan la distribución espacial de diferentes parámetros geotécnicos:
 - Clasificación SUCS y AASHTO
 - Índice CBR
 - Ángulo de fricción interna
 - Cohesión
 - Índice de compresibilidad
 - Carga de preconsolidación
 - Porcentaje de arena
- 3) **Delimitar las zonas geotécnicas:** a partir de la superposición de los mapas temáticos y la homogeneidad de los parámetros, se definieron las cinco zonas geotécnicas del distrito.
- 4) **Elaborar perfiles estratigráficos:** se generaron perfiles verticales del suelo para cada calicata, mostrando la secuencia de estratos y sus clasificaciones.

3.4.4 Productos finales

Los productos generados a partir del procesamiento de datos incluyen:

- Tablas resumen con los parámetros geotécnicos de diseño para cada zona.
- Gráficos de ensayos (curvas granulométricas, de compactación, de consolidación, de corte, etc.).
- Mapas de zonificación geotécnica y geológica del distrito de Pillcomarca.
- Perfiles estratigráficos de las calicatas.

- Conclusiones y recomendaciones técnicas para la planificación urbana y el diseño de cimentaciones.

Estos productos constituyen la base técnica para la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial, gestión de riesgos geológicos y diseño de infraestructura en el distrito de Pillcomarca.



CAPÍTULO 4. Reconocimiento geológico y geotécnico del terreno



4.1 Zona 1 – Área Urbana Central

La Zona 1 se localiza en el sector de Cayhuayna, dentro del distrito de Pillcomarca, en la provincia y departamento de Huánuco. Desde el punto de vista fisiográfico, el área se encuentra en el flanco oriental de la Cordillera Oriental de los Andes peruanos, en una zona de transición hacia la región subandina. Su topografía es predominantemente accidentada, con pendientes pronunciadas, cerros escarpados y valles fluviales bien definidos, lo que condiciona de manera significativa los procesos geológicos y geodinámicos activos del sector. 【177†L5-L11】

Geomorfología

En la Zona 1 se identifican dos unidades geomorfológicas principales. La primera son las Altas Cumbres de la Cordillera Oriental, caracterizadas por un relieve abrupto con cerros alineados predominantemente en dirección NE–SO, presencia de quebradas profundas y valles angostos, con altitudes que oscilan entre los 2,500 y 3,800 msnm. Los procesos dominantes en esta unidad son la erosión hídrica, los procesos aluviales y los remanentes de acción glaciaria cuaternaria. 【178†L1-L9】

La segunda unidad es el Valle de fondo amplio, una depresión longitudinal ocupada por el río Huallaga, con terrazas fluvioaluviales extensas y pendientes suaves. Estas áreas están destinadas principalmente a actividades agrícolas y son afectadas por procesos de sedimentación fluvial e inundaciones periódicas. 【178†L10-L16】

Geología regional y litología

La geología de la Zona 1 está constituida por una asociación de rocas metamórficas, ígneas intrusivas y depósitos sedimentarios cuaternarios. La unidad más antigua y predominante es el Complejo Marañón (Neoproterozoico, Paleozoico Inferior), compuesto por esquistos filíticos, micasquistos y filitas con estratos delgados (0.10–0.20 m), de colores verdes a grises con oxidación rojiza superficial. Presenta un rumbo NW–SE y buzamiento de 60°–70° al SW, y se encuentra altamente fracturada y meteorizada. 【178†L18-L28】

El Batolito de Higuera – Marabamba (Cretácico – Paleógeno) está formado por granitos, granodioritas y dioritas de textura granular, con minerales dominantes como cuarzo, feldespatos, biotita y hornblenda. Presenta alta

resistencia mecánica y diaclasamiento superficial por intemperismo. 【178†L29-L35】

La Formación Marabamba (Cuaternario reciente) consiste en conglomerados con clastos redondeados de hasta 3 pulgadas, cementados con carbonatos, con un espesor de 20 a 30 metros. Esta unidad presenta una alta capacidad portante (superior a 3.0 kg/cm^2), lo que la hace favorable para cimentaciones. 【178†L36-L40】

Geología estructural

No se identifican fallas geológicas de escala regional dentro del área específica de la Zona 1. Sin embargo, la zona se encuentra influenciada por la Falla de Huilly, ubicada aproximadamente a 25 km al sur, con orientación Sur-norte. En el Complejo Maraón, el fracturamiento es intenso y generalmente paralelo a la esquistosidad, con orientación predominante NW-SE. En las rocas intrusivas, las diaclasas se presentan en múltiples direcciones, siendo más frecuentes las orientaciones N-S y NW-SE, asociadas a procesos de enfriamiento y esfuerzos tectónicos posteriores. 【179†L1-L16】

Geodinámica externa

La Zona 1 presenta diversos procesos geodinámicos externos activos que representan factores de riesgo para el desarrollo de obras civiles. Las áreas próximas a los ríos Huallaga, Higuera y Huancachupa, así como sectores cercanos a canales de riego, son susceptibles a inundaciones durante épocas de lluvias intensas, debido al desborde de los cauces y a la baja pendiente de las terrazas aluviales. 【179†L18-L24】

Se observa erosión de riberas, con socavación y remoción progresiva de material en los tramos sinuosos de los ríos, especialmente en materiales poco consolidados, lo que puede generar inestabilidad de taludes y pérdida de terreno.

【180†L1-L3】

Las laderas con pendientes pronunciadas, conformadas por suelos cohesivos y rocas fracturadas, son propensas a deslizamientos, especialmente durante periodos de saturación por lluvias y por la intervención antrópica asociada a cortes de terreno. 【180†L5-L8】

En las quebradas del sector noroeste de la zona (Pillcomarca), con pendientes entre 30° y 40°, se presentan condiciones favorables para la ocurrencia de huaycos (flujos de detritos), principalmente en suelos aluviales y coluviales carentes de cobertura vegetal. 【180†L10-L13】

4.2 Zona 2 – Área de Transición

La Zona 2 corresponde a la localidad de Cayhuayna, en el distrito de Pillcomarca. Desde el punto de vista fisiográfico, se emplaza en el sector oriental de la Cordillera Oriental de los Andes, próximo a la transición con la región sub-andina. Esta ubicación le confiere una topografía compleja, con contrastes marcados entre relieves montañosos y áreas de valle, condicionando tanto la geodinámica superficial como el comportamiento geotécnico de los materiales presentes. 【180†L15-L22】

Geomorfología

La geomorfología de la Zona 2 está controlada por la interacción entre el relieve montañoso andino y el sistema fluvial del río Huallaga. Se reconocen dos unidades principales: las Altas Cumbres de la Cordillera Oriental, con

relieve abrupto, laderas empinadas y fuerte disección por quebradas profundas (2,500–3,800 msnm), donde predominan la erosión hídrica, la meteorización física y la acción glaciaria relictas del Cuaternario; y el Valle de Fondo Amplio, una depresión longitudinal asociada al valle del río Huallaga, con terrazas fluvio-aluviales de pendientes suaves, afectada por sedimentación fluvial, remodelación aluvial e inundaciones estacionales. 【181†L1-L12】

Geología regional y litología

La geología de la Zona 2 refleja la evolución tectónica andina, con la presencia de un basamento metamórfico antiguo, intrusiones ígneas mesozoicas-cenozoicas y depósitos sedimentarios recientes. El Complejo Maraón (Neoproterozoico) constituye la unidad basal predominante, con esquistos filíticos, micasquistos y filitas de estratificación delgada (0.10–0.20 m), color verde a gris con oxidación superficial, rumbo NW–SE y buzamiento de 60°–70° al SW, con alto grado de fracturamiento. 【182†L5-L11】

El Batolito de Marabamba (Higueras) (Cretácico–Paleógeno) es una roca competente con diaclasamiento superficial de 1–2 m y muy alta capacidad portante ($>10 \text{ kg/cm}^2$). 【182†L12-L13】

La Formación Marabamba (Holoceno) está compuesta por conglomerados cementados con carbonatos, con clastos redondeados de hasta 3 pulgadas y un espesor de 20–30 m, presentando una buena capacidad portante ($>3.0 \text{ kg/cm}^2$), apta para cimentaciones superficiales. Los depósitos aluviales, coluviales y fluviales son materiales heterogéneos con matriz arenosa, limosa o arcillosa, con espesores menores a 20 m y capacidad portante variable ($>1.0 \text{ kg/cm}^2$). 【182†L12-L17】

Geología estructural

Desde el punto de vista estructural, la Zona 2 forma parte de la Cordillera Oriental, afectada por múltiples eventos tectónicos asociados a la orogenia andina. El Complejo Marañón presenta esquistosidad bien desarrollada con orientación predominante NW–SE y buzamientos elevados hacia el suroeste, además de un fracturamiento intenso. El Batolito de Marabamba exhibe sistemas de diaclasas en diversas direcciones, producto del enfriamiento magmático y esfuerzos tectónicos posteriores. No se identifican fallas activas de escala regional dentro del área específica de Cayhuayna. 【182†L20-L26】

Geodinámica externa y peligros geológicos

Las condiciones geomorfológicas, litológicas y climáticas favorecen el desarrollo de procesos geodinámicos superficiales. Las laderas empinadas conformadas por esquistos fracturados y depósitos coluviales presentan susceptibilidad a movimientos en masa (deslizamientos), especialmente durante periodos de lluvias intensas. Las terrazas aluviales bajas del río Huallaga y del río Huancachupa son propensas a inundaciones periódicas y socavación lateral. Las quebradas con pendientes pronunciadas y acumulación de material suelto pueden activar huaycos o flujos de detritos durante eventos pluviales extremos. 【183†L1-L9】

4.3 Zona 3 – Área de Ladera

La Zona 3 corresponde al sector urbano del distrito de Pillcomarca, comprendido dentro del Cuadrángulo de Huánuco según la cartografía geológica oficial del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

【183†L11-L17】 Fisiográficamente, se emplaza en un valle fluvial interandino

de la Cordillera Oriental de los Andes peruanos, caracterizado por la presencia de depósitos cuaternarios recientes que cubren el basamento rocoso más antiguo (Quispesivana Quispe, 1996). Esta condición resulta determinante para el análisis geotécnico y la evaluación de peligros geológicos en el área urbana.

【184†L1-L4】

Geomorfología

El modelado del relieve en la Zona 3 está dominado por la acción del sistema fluvial del río Huallaga. La unidad principal es el Valle Fluvial del Río Huallaga, un fondo de valle de baja altitud ocupado por terrazas aluviales recientes donde se desarrolla la mayor parte del área urbana, con pendientes suaves y alta intervención antrópica. Los procesos asociados incluyen erosión lateral y vertical, sedimentación aluvial, inundaciones periódicas y remodelación de riberas. Adicionalmente, se identifican zonas de transición entre el fondo del valle y las elevaciones circundantes de la Cordillera Oriental, con pendientes moderadas a fuertes, donde predominan la erosión hídrica superficial, deslizamientos locales y flujos de detritos en sectores inestables. 【184†L6-L15

】

Geología regional y litología

De acuerdo con la cartografía geológica del INGEMMET (Quispesivana Quispe, 1996), la Zona 3 se encuentra asentada casi en su totalidad sobre depósitos aluviales recientes (Qr-Al) de edad Cuaternaria (Holoceno). Estos son materiales no consolidados constituidos por arenas, limos y gravas, con fragmentos de roca de diversa procedencia litológica (rocas metamórficas como esquistos y gneises, y rocas intrusivas como granitos y tonalitas), transportados y depositados por el río Huallaga y sus afluentes. Estos depósitos cubren completamente el área urbana de estudio y constituyen el principal material

analizado en las investigaciones geotécnicas. El basamento geológico subyacente (Neoproterozoico–Cenozoico) no aflora en superficie dentro de la zona urbana. 【185†L1-L11】

Geología estructural

A escala regional, el valle del Huallaga constituye una depresión estructural controlada por grandes sistemas de fallas y pliegues asociados a la evolución tectónica de la Cordillera Oriental. Sin embargo, a escala local, la Zona 3 se encuentra cubierta por depósitos aluviales recientes de varios metros de espesor, lo que impide la observación directa de estructuras geológicas del basamento, tales como fallas o fracturas. En consecuencia, la prospección estructural se limita a una interpretación indirecta basada en la cartografía regional y el contexto geológico general. 【185†L13-L19】

Geodinámica externa y peligros geológicos

La dinámica superficial en la Zona 3 está fuertemente influenciada por la presencia de suelos no consolidados y por la actividad fluvial del río Huallaga. Las inundaciones fluviales constituyen el peligro geológico dominante; las terrazas aluviales bajas (Qr-Al) presentan alta exposición a desbordes del río Huallaga y quebradas tributarias durante eventos de lluvias intensas. La erosión de riberas es un proceso activo en las márgenes del río, especialmente en sectores curvos, generando socavación lateral y pérdida progresiva de terreno. Los depósitos aluviales recientes, en particular las arenas limosas saturadas, presentan susceptibilidad potencial a licuación de suelos ante sismos de magnitud considerable, debido a su baja densidad relativa y nivel freático elevado. La heterogeneidad granulométrica y la variabilidad en la compacidad

de los suelos aluviales favorecen la ocurrencia de asentamientos diferenciales bajo cargas estructurales. 【186†L1-L12】

4.4 Zona 4 – Cayhuayna Alta

La Zona 4 corresponde al sector de Cayhuayna Alta, en el distrito de Pillcomarca. La prospección geológica se fundamentó principalmente en la interpretación del Mapa Geológico del Cuadrángulo de Huánuco elaborado por INGEMMET (Quispesivana Quispe, 1996). 【187†L1-L5】

Geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico, la Zona 4 se localiza en un sector de transición entre el valle principal del río Huallaga y las estribaciones montañosas de la Cordillera Oriental, presentando un relieve moderadamente accidentado. La unidad geomorfológica dominante son las laderas y estribaciones de la Cordillera Oriental, caracterizadas por pendientes moderadas a fuertes que descienden hacia el fondo del valle. Los procesos activos incluyen la erosión hídrica superficial y la remoción en masa de tipo superficial, especialmente en sectores con suelos poco cohesionados o con alteración antrópica asociada a actividades de construcción y uso agrícola. 【187†L6-L15】

Geología regional y litología

El análisis de la cartografía geológica oficial del INGEMMET (Quispesivana Quispe, 1996) permitió identificar la presencia de dos unidades geológicas principales. La Tonalita – Granodiorita (KP-to-gd) es una roca ígnea intrusiva de composición intermedia, textura fanerítica, con minerales

dominantes como plagioclasa, cuarzo, biotita y hornblenda. Presenta alta resistencia mecánica y buen comportamiento estructural, y constituye el basamento rocoso aflorante en gran parte del área, formando las elevaciones y laderas más estables. 【188†L1-L5】

Los depósitos aluviales recientes (Qr-al) son materiales no consolidados compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas en proporciones variables, con suelos sueltos a medianamente compactos, depositados por corrientes de agua. Se localizan en zonas topográficamente bajas, fondos de quebradas y superficies de pendiente suave, apoyándose discordantemente sobre la roca intrusiva. 【188†L1-L5】

Geología estructural

A escala regional, la Zona 4 se encuentra influenciada por la tectónica de la Cordillera Oriental, responsable del emplazamiento de los cuerpos intrusivos del batolito y del relieve actual. A escala local, se reconoce un contacto geológico discordante entre la roca intrusiva tonalítica–granodiorítica (KP-to-gd) y los depósitos aluviales recientes (Qr-al), definido por la topografía irregular. La unidad KP-to-gd presenta sistemas de diaclasas generados por procesos de enfriamiento magmático y esfuerzos tectónicos posteriores, los cuales condicionan la meteorización y la estabilidad de taludes en roca. No se identifican fallas de escala significativa dentro del área de estudio. 【189†L1-L8】

4.5 Zona 5 – Área Urbana Alta

La Zona 5 se localiza en el sector urbano del distrito de Pillcomarca, comprendiendo un polígono urbano de aproximadamente 0.13 km², delimitado

por el Campo Molles al norte, los jirones 28 de Julio y Unión al sur, la Avenida Universitaria y el jirón Ficus al este, y por áreas de cerro y urbanización incipiente al oeste. Regionalmente, el área se encuentra dentro del valle interandino del río Huallaga, perteneciente a la Cordillera Oriental, sobre depósitos cuaternarios típicos de ambientes de valle y pie de monte. 【189†L10-L17】

Geomorfología

Geomorfológicamente, la Zona 5 se asienta sobre un abanico aluvial antiguo disectado, correspondiente a un ambiente de yunga del valle del Pillco. Esta superficie constituye la base física sobre la cual se ha desarrollado el crecimiento urbano del distrito. Las principales unidades geomorfológicas identificadas son: una superficie de abanico aluvial antiguo, con pendientes suaves a moderadas, ligeramente disectada por drenajes menores; y laderas de transición y pie de cerro, ubicadas principalmente hacia el sector occidental, con pendientes más pronunciadas. Los procesos dominantes incluyen la erosión hídrica superficial, la intervención antrópica y la remoción en masa superficial. 【190†L1-L13】

Geología y litología

La geología superficial de la Zona 5 está dominada por depósitos cuaternarios coluvio-aluviales, sin afloramiento del basamento rocoso dentro de la profundidad explorada. El depósito coluvio-aluvial se caracteriza por una matriz areno-arcillosa, con contenido significativo de arcillas; presencia ocasional de gravas y fragmentos de roca subangulares a subredondeados; coloración parda a pardo oscuro; y espesor mayor a 3.0 m, según lo observado en las calicatas. Adicionalmente, se identificaron niveles superficiales de relleno

antrópico en zonas puntuales, asociados a actividades de nivelación y construcción. 【191†L1-L9】

Geología estructural

Desde el punto de vista estructural, la Zona 5 se encuentra dentro de la depresión estructural del valle del Huallaga, asociada a la tectónica de la Cordillera Oriental. Sin embargo, a escala local y dentro de la profundidad investigada, no se reconocen estructuras tectónicas mayores. Las observaciones realizadas en las calicatas indican una estratificación subhorizontal a ligeramente inclinada, producto de pulsos deposicionales sucesivos, y ausencia de fallas, pliegues o fracturamiento significativo en los materiales no consolidados. 【192†L1-L7】

4.6 Peligros geológicos identificados

A lo largo de las cinco zonas estudiadas, se han identificado diversos procesos geodinámicos activos que representan peligros geológicos significativos para el desarrollo urbano y la construcción de infraestructura. Estos peligros varían en intensidad y frecuencia según la ubicación y las características del terreno.

Inundaciones

Las inundaciones constituyen el peligro geológico más extendido en el área de estudio. Se presentan principalmente en las áreas próximas a los ríos Huallaga, Higuera y Huancachupa, así como en sectores cercanos a canales de riego. Son especialmente críticas durante épocas de lluvias intensas, debido al desborde de los cauces y a la baja pendiente de las terrazas aluviales. 【179†L18-

L24】 En la Zona 3, las terrazas aluviales bajas (Qr-Al) presentan alta exposición a desbordes del río Huallaga y quebradas tributarias. **【186†L3-L5】** En la Zona 2, las terrazas aluviales bajas son propensas a inundaciones periódicas. **【183†L1-L9】**

Erosión de riberas

La erosión de riberas es un proceso activo en las márgenes de los ríos, especialmente en tramos sinuosos y en materiales poco consolidados. Genera socavación lateral y pérdida progresiva de terreno, lo que puede comprometer la estabilidad de taludes y de las estructuras cercanas. **【180†L1-L3】 【186†L5-L7】**

Deslizamientos

Los deslizamientos son comunes en las laderas con pendientes pronunciadas, conformadas por suelos cohesivos y rocas fracturadas. Son especialmente frecuentes durante periodos de saturación por lluvias y por la intervención antrópica asociada a cortes de terreno. **【180†L5-L8】** En la Zona 2, las laderas empinadas conformadas por esquistos fracturados y depósitos coluviales presentan susceptibilidad a movimientos en masa. **【183†L1-L9】** En la Zona 3, se identifican deslizamientos locales en las zonas de transición con pendientes moderadas a fuertes. **【184†L6-L15】**

Huaycos (flujos de detritos)

Los huaycos son flujos de detritos que se activan en quebradas con pendientes pronunciadas y acumulación de material suelto. En la Zona 1, las

quebradas del sector noroeste (Pillcomarca), con pendientes entre 30° y 40°, presentan condiciones favorables para su ocurrencia, principalmente en suelos aluviales y coluviales carentes de cobertura vegetal. 【180†L10-L13】 En la Zona 2, las quebradas con pendientes pronunciadas y acumulación de material suelto pueden activar flujos de detritos durante eventos pluviales extremos. 【183†L1-L9】 En la Zona 3, se registran flujos de detritos en sectores inestables de las zonas de transición. 【184†L6-L15】

Licuación de suelos

La licuación de suelos es un fenómeno potencial en los depósitos aluviales recientes, en particular las arenas limosas saturadas. Presentan susceptibilidad a licuación ante sismos de magnitud considerable, debido a su baja densidad relativa y nivel freático elevado. Este peligro es especialmente relevante en la Zona 3. 【186†L7-L9】

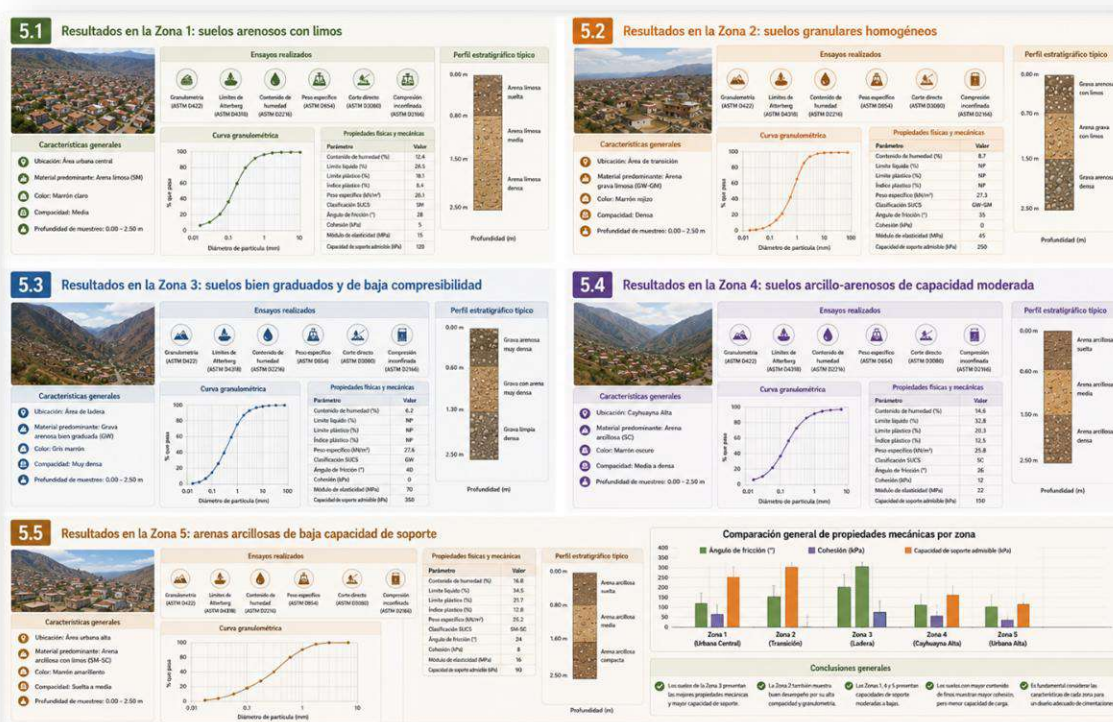
Asentamientos diferenciales

La heterogeneidad granulométrica y la variabilidad en la compacidad de los suelos aluviales favorecen la ocurrencia de asentamientos desiguales bajo cargas estructurales. Este fenómeno es crítico en la Zona 3, donde los depósitos aluviales recientes presentan una amplia variabilidad en sus propiedades. 【186†L10-L12】



PARTE III: RESULTADOS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS

CAPÍTULO 5. Propiedades físicas y mecánicas de los suelos por zona



5.1 Resultados en la Zona 1: suelos arenosos con limos

5.1.1 Caracterización General

La Zona 1 del distrito de Pillcomarca presenta una composición edáfica dominada por arenas mal graduadas con presencia de limos, cuyas propiedades físicas y mecánicas fueron determinadas mediante ensayos realizados en tres

calicatas (C-1, C-2 y C-3) a profundidades variables de 1.5 a 3.0 metros (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Resumen de clasificación de suelos - Zona 1

Cali cata	Profundi dad (m)	Estrato	SUCS	AASHTO	LL (%)	IP (%)	Finos (%)
C-1	0.0-0.8	E1	SP-ML	A-2-4	28.80	3.56	5.09
C-1	0.8-1.8	E2	SP-ML	A-2-4	30.10	1.69	7.23
C-1	1.8-3.0	E3	SP-ML	A-2-4	13.00	1.38	3.12
C-2	0.0-0.8	E1	SP-MH	A-2-5	57.35	2.80	9.08
C-2	0.8-1.5	E2	SP-MH	A-2-5	55.90	2.54	2.84
C-3	0.0-1.5	E1	SP-ML	A-2-5	45.00	6.07	1.65

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.134 (INACAL - Instituto Nacional de Calidad, 2019); ASTM D 2487 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2025)

5.1.2 Propiedades Granulométricas

El análisis granulométrico reveló que los suelos de la Zona 1 se caracterizan por una distribución deficiente de tamaños de partículas. Los coeficientes de uniformidad (C_u) varían entre 8.709 y 26.163, mientras que los coeficientes de curvatura (C_c) oscilan entre 0.559 y 0.814, lo que confirma la condición de suelos mal graduados (Das, 2001). El porcentaje de finos que pasa el tamiz N°200 es inferior al 10% en todos los estratos analizados, con valores que fluctúan entre 1.65% y 9.08%.

Los diámetros efectivos determinados para el estrato principal (C-1, E-1) fueron: $D_{10} = 0.10$ mm, $D_{30} = 0.31$ mm y $D_{60} = 1.23$ mm, evidenciando una predominancia de partículas en el rango de arenas medias a finas. Esta

distribución granulométrica confiere al suelo una permeabilidad moderada a alta, típica de materiales granulares con bajo contenido de finos (Craig & Knappett, 2012).

5.1.3 Límites de Consistencia

Los límites de Atterberg muestran una notable variabilidad entre las calicatas evaluadas. La Calicata C-1 presenta límites líquidos entre 13.00% y 30.10%, con índices de plasticidad que no superan el 3.56%, clasificando al suelo como de baja plasticidad. En contraste, la Calicata C-2 exhibe límites líquidos excepcionalmente elevados (55.90-57.35%) con índices de plasticidad entre 2.54% y 2.80%, lo que indica la presencia de limos de alta plasticidad (SP-MH según SUCS).

La Calicata C-3 presenta un comportamiento intermedio con límite líquido de 45.00% e índice de plasticidad de 6.07%. Según Terzaghi, Peck y Mesri (1996), estos valores reflejan una susceptibilidad moderada a cambios volumétricos ante variaciones en el contenido de humedad, lo que debe considerarse en el diseño de cimentaciones superficiales.

5.1.4 Propiedades de Compactación y Resistencia

5.1.4.1 Ensayo Proctor Modificado

El ensayo de compactación Proctor modificado, realizado en la Calicata C-1, permitió establecer la curva de compactación característica del suelo de la Zona 1. Los resultados evidencian una humedad óptima de 4.5% y una densidad seca máxima de 22.8 kN/m³ (2.33 g/cm³), correspondientes a una energía de compactación de 2.70 MJ/m³ (Bowles, 1997).

La curva de compactación presenta un pico definido en torno al 4.5% de contenido de humedad, con una disminución progresiva de la densidad seca al incrementarse el contenido de agua por encima del óptimo. Este comportamiento es típico de suelos arenosos donde el exceso de agua genera expansión volumétrica que dificulta la reorganización de las partículas sólidas (Das, 2001).

5.1.4.2 Ensayo CBR

El índice de California Bearing Ratio (CBR) fue evaluado en la Calicata C-1 para diferentes energías de compactación. Los valores obtenidos muestran una dependencia directa con el nivel de compactación aplicado:

- 12 golpes/capa: CBR = 25.34% (0.1") y 32.66% (0.2")
- 26 golpes/capa: CBR = 23.78% (0.1") y 24.05% (0.2")
- 56 golpes/capa: CBR = 48.79% (0.1") y 46.60% (0.2")

El incremento significativo del CBR al aumentar la energía de compactación confirma la importancia del control de compactación para alcanzar la capacidad de soporte requerida en obras viales y de infraestructura ASTM D 1883 (ASTM, 2021). Los valores obtenidos clasifican al suelo como regular a bueno para subrasante, dependiendo del nivel de compactación alcanzado (Bowles, 1997).

5.1.4.3 Parámetros de Resistencia al Corte

El ensayo de corte directo consolidado-drenado (CD) permitió determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo de la Zona 1. La envolvente de falla de Mohr-Coulomb, obtenida para esfuerzos normales de 6, 8, 10 y 12 kg, presenta la siguiente ecuación característica:

$$\tau = 0.6945\sigma + 5.5689$$

Donde:

- Cohesión (c') = 5.57 kN/m²
- Ángulo de fricción interna (φ') = 34.8°

Estos valores son representativos de un suelo granular con comportamiento friccional dominante, donde la cohesión resulta prácticamente despreciable para fines de diseño conservador. El ángulo de fricción obtenido permite clasificar al material como suelo granular de compactación media a densa, una vez adecuadamente compactado (Terzaghi et al., 1996). Las curvas esfuerzo-deformación muestran un comportamiento de endurecimiento progresivo sin evidencia de falla frágil, típico de arenas densas (Craig & Knappett, 2012).

5.1.5 Propiedades de Compresibilidad

El ensayo de consolidación unidimensional, realizado conforme a la NTP 339.154 (INACAL, 2015); ASTM D 2435 (ASTM, 2020), permitió caracterizar el comportamiento deformacional del suelo frente a cargas verticales. La curva de compresibilidad evidencia una relación de vacíos inicial de 0.915, que disminuye progresivamente hasta 0.847 al aplicarse una presión de 8 kg/cm².

Los parámetros de consolidación determinados son:

- Índice de compresibilidad (C_c): 0.091
- Carga de preconsolidación (σ'_p): 3.0 kg/cm² (300 kN/m²)
- Coeficiente de consolidación (C_{v50}): 29.76-45.40 cm²/min

El bajo índice de compresibilidad (0.091) indica que el suelo presenta baja capacidad de compresión bajo carga, comportamiento típico de arenas compactadas donde las partículas tienden a ser más estables y difíciles de comprimir en comparación con suelos finos (Terzaghi et al., 1996). La carga de preconsolidación de 300 kN/m² sugiere que el suelo ha experimentado esfuerzos previos de magnitud similar, por lo que los asentamientos esperados bajo cargas de servicio serán reducidos (Das, 2001).

La evolución del coeficiente de consolidación con el incremento de presión muestra una pendiente decreciente en el tramo de 2-8 kg/cm², indicando que el suelo está perdiendo permeabilidad con el aumento de la presión aplicada, comportamiento típico de arenas finas (Craig & Knappett, 2012).

5.1.6 Caracterización Geotécnica Integral

La Zona 1 presenta condiciones geotécnicas favorables para el desarrollo urbano, con suelos granulares de alta resistencia por fricción ($\varphi' = 34.8^\circ$), baja compresibilidad ($C_c = 0.091$) y buena capacidad portante. Bajo un adecuado control de compactación y humedad, es una zona altamente apta para cimentaciones superficiales y obras de infraestructura vial. Los parámetros de diseño recomendados para la Zona 1 se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Parámetros geotécnicos de diseño - Zona 1

Parámetro	Valor	Unidad
Cohesión (c')	5.57	kN/m ²
Ángulo de fricción (φ')	34.8	°
Módulo de elasticidad (E)	30	MPa
Relación de Poisson (ν)	0.25-0.35	-

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad portante admisible (zapata aislada)	217	kPa
Capacidad portante admisible (zapata corrida)	193	kPa
Asentamiento total esperado	7-23	mm

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados experimentales

5.2 Resultados en la Zona 2: suelos granulares homogéneos

5.2.1 Caracterización General

La Zona 2 se caracteriza por la presencia de suelos granulares homogéneos, predominantemente arenas mal graduadas (SP según SUCS), con bajo contenido de finos y comportamiento mecánico consistente. Los ensayos realizados en la calicata principal y las calicatas secundarias (C-4, C-5 y C-6) evidencian una notable uniformidad espacial de las propiedades geotécnicas.

5.2.2 Propiedades Granulométricas

El análisis granulométrico de la calicata central (3 m de profundidad) revela la siguiente distribución granulométrica para el estrato 1:

Tabla 5.3 Distribución granulométrica - Zona 2 (Estrato 1)

Fracción	Porcentaje (%)
Grava	21.79
Arena	76.25
Finos (< N°200)	1.96

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Los coeficientes granulométricos determinados fueron:

- Coeficiente de uniformidad (C_u): 4.71
- Coeficiente de curvatura (C_c): 0.84
- Diámetro efectivo (D_{10}): 0.13 mm

Para el estrato 2, la distribución presenta un mayor predominio de arena (95.97%) y un contenido de finos prácticamente nulo (0.86%), con un coeficiente de uniformidad de 5.25 y un coeficiente de curvatura de 0.97. Estos valores indican un suelo mal graduado, con predominancia de partículas de tamaño arena, característico de depósitos aluviales recientes (Das, 2001).

5.2.3 Límites de Consistencia

Los límites de Atterberg determinados para ambos estratos muestran valores bajos, coherentes con su naturaleza granular:

Estrato 1:

- Límite líquido (LL): 31.07%
- Límite plástico (LP): 18.80%
- Índice de plasticidad (IP): 12.27%

Estrato 2:

- Límite líquido (LL): 21.39%
- Límite plástico (LP): 13.38%
- Índice de plasticidad (IP): 8.01%

El índice de plasticidad del estrato 2 (8.01%) es ligeramente superior al rango típico de arenas limpias, lo que sugiere la presencia de finos no plásticos o de baja plasticidad (Terzaghi et al., 1996). La clasificación según SUCS

confirma que se trata de una arena mal graduada (SP), mientras que según AASHTO se clasifica como A-2-4 y A-2-6 (gravas y arenas limosas o arcillosas).

5.2.4 Propiedades de Compactación

5.2.4.1 Proctor Modificado

Los ensayos de compactación Proctor modificado realizados en ambos estratos permitieron establecer las condiciones óptimas de compactación:

Tabla 5.4 Parámetros de compactación - Zona 2

Parámetro	Estrato 1	Estrato 2
Humedad óptima (OCH)	13.52%	11.14%
Densidad seca máxima (γ_{dmax})	2.256 g/cm ³	2.075 g/cm ³
Densidad húmeda máxima	2.56 g/cm ³	2.307 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.141 (INACAL, 2019); ASTM D 1557 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2021)

La curva de compactación del estrato 1 muestra un comportamiento típico de suelos con buena respuesta a la compactación, alcanzando densidades elevadas (2.256 g/cm³) dentro de un rango de humedad moderado. El exceso de agua más allá del óptimo provoca una disminución progresiva de la densidad seca, indicando saturación del suelo que impide la reorganización eficiente de las partículas (Bowles, 1997).

5.2.4.2 Ensayo CBR

El ensayo CBR, realizado en el estrato 2 de la calicata principal, evidencia la influencia directa de la energía de compactación en la capacidad de soporte:

Tabla 5.5 Resultados CBR - Zona 2 (Estrato 2)

Golpes/capa	Densidad seca (kg/m ³)	CBR (%)
10	1903.91	11.03
25	2128.07	11.11
56	2198.48	14.29

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio ASTM D 1883 (ASTM, 2021)

Los valores de CBR obtenidos (11.03-14.29%) indican una capacidad de soporte limitada en estado natural, aunque mejorable mediante compactación controlada. La relación directa entre densidad seca y CBR confirma que la compactación es el factor más determinante para la capacidad portante de estos suelos granulares (Bowles, 1997).

5.2.5 Propiedades de Compresibilidad

El ensayo de consolidación unidimensional, realizado en el estrato 1 de la calicata principal, proporcionó los siguientes parámetros:

- Índice de compresibilidad (C_c): 0.091
- Carga de preconsolidación (σ'_p): 3.0 kg/cm² (300 kN/m²)
- Coeficiente de consolidación (C_v): 29.76-45.40 cm²/min (para presiones de 4-8 kg/cm²)

La baja compresibilidad ($C_c = 0.091$) es característica de suelos arenosos compactos, donde las partículas muestran alta resistencia a la deformación bajo carga (Terzaghi et al., 1996). La carga de preconsolidación de 300 kN/m^2 indica que el suelo ha estado sometido a esfuerzos de magnitud similar en el pasado, por lo que los asentamientos adicionales bajo cargas de servicio serán reducidos.

El análisis de la curva C_v vs. Presión muestra una pendiente decreciente con el incremento de carga ($2\text{-}8 \text{ kg/cm}^2$), indicando una pérdida de permeabilidad a medida que el suelo se compacta bajo carga. Este comportamiento es típico de arenas finas con contenido variable de finos.

5.2.6 Parámetros de Resistencia al Corte

El ensayo de corte directo consolidado-drenado (CD), realizado en el estrato 1 de la calicata principal, permitió determinar los parámetros de resistencia mediante la envolvente de Mohr-Coulomb:

$$\tau = 0.5751\sigma + 0.1551$$

Donde:

- Cohesión (c') = 0.1551 kg/cm^2 (15.51 kN/m^2)
- Ángulo de fricción interna (ϕ') = 29.90° ($\approx 30^\circ$)

La resistencia al corte del suelo está dominada por la fricción interna, siendo la cohesión relativamente baja (15.51 kN/m^2). El ángulo de fricción de 30° es consistente con suelos granulares de compacidad media a densa (Terzaghi et al., 1996). Las curvas esfuerzo-deformación para los diferentes esfuerzos normales ($6, 8, 10$ y 12 kg) muestran un comportamiento de endurecimiento progresivo, sin evidencia de falla frágil, característico de arenas compactas (Craig & Knappett, 2012).

5.2.7 Caracterización Geotécnica Integral

La Zona 2 presenta condiciones geotécnicas favorables para el desarrollo de obras civiles, con suelos granulares homogéneos, baja compresibilidad y capacidad portante moderada a buena. La homogeneidad espacial de los parámetros entre las calicatas evaluadas permite considerar a la zona como geotécnicamente uniforme.

Tabla 5.6 Parámetros geotécnicos de diseño - Zona 2

Parámetro	Valor	Unidad
Clasificación SUCS	SP	-
Clasificación AASHTO	A-2-4/A-2-6	-
Cohesión (c')	15.51	kN/m ²
Ángulo de fricción (φ')	30	°
Humedad óptima (OCH)	11.14-13.52	%
Densidad seca máxima	2.075-2.256	g/cm ³
CBR de diseño	11-14	%

Fuente: Elaboración propia

5.3 Resultados en la Zona 3: suelos bien graduados y de baja compresibilidad

5.3.1 Caracterización General

La Zona 3 presenta una heterogeneidad geotécnica significativa, con presencia de suelos clasificados como SW, SP, SM y SW-SC según el sistema SUCS. Los suelos bien graduados (SW) se caracterizan por su alta estabilidad y

buena capacidad de soporte, mientras que los suelos con mayor contenido de finos (SM, SC) muestran mayor sensibilidad a la humedad (Terzaghi et al., 1996).

5.3.2 Clasificación y Propiedades Índice

Los ensayos realizados en las calicatas de la Zona 3 (C-7, C-8, C-9 y C-10) permitieron identificar tres tipos principales de suelos:

Tabla 5.7 Clasificación de suelos - Zona 3

Calicata	Estrato	SUCS	AASHTO	LL (%)	LP (%)	IP (%)
C01-E01	1	SW	A-1-b	20.2	14.9	5.3
C01-E02	2	SW-SC	A-1-b	22.6	16.7	5.8
C02-E01	1	SW	A-1-b	20.2	14.9	5.0
C02-E02	2	SP	A-2-4	18.6	17.0	1.6
C03-E01	1	SW	A-1-b	20.0	15.0	5.0
C03-E02	2	SW-SC	A-1-b	22.6	16.7	5.8

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio (NTP 339.134 (INACAL - Instituto Nacional de Calidad, 2019); ASTM D 2487 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2025))

Los límites líquidos oscilan entre 18.6% y 22.6%, mientras que los índices de plasticidad varían entre 1.6% y 5.8%, evidenciando baja plasticidad en todos los casos. Según la clasificación AASHTO, los suelos se enmarcan principalmente en el grupo A-1-b (material granular con partículas finas y porcentaje moderado de material cohesivo), lo que indica excelentes propiedades estructurales y adecuada estabilidad (Das, 2001).

5.3.3 Propiedades Granulométricas

El análisis granulométrico de la Calicata C02-E01 (Tabla 5.8) muestra una distribución bien graduada típica de suelos SW:

Tabla 5.8 Análisis granulométrico - C02-E01

Tamiz	Abertura (mm)	% Pasa
3"	76.200	100.00
1"	25.400	98.80
3/4"	19.000	96.20
3/8"	9.510	82.80
Nº4	4.760	68.00
Nº10	2.000	55.80
Nº40	0.420	31.90
Nº100	0.149	13.20
Nº200	0.074	4.20

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Los coeficientes granulométricos determinados para este suelo son:

- Coeficiente de uniformidad (Cu): >6
- Coeficiente de curvatura (Cc): 0.92
- Contenido de finos: 4.2%

La buena graduación ($C_u > 6$) y el coeficiente de curvatura cercano a 1.0 indican una distribución óptima de tamaños de partículas, lo que confiere al suelo alta densidad y estabilidad mecánica.

5.3.4 Propiedades de Compactación

5.3.4.1 Proctor Modificado

Los ensayos Proctor modificados realizados en la Zona 3 muestran comportamientos diferenciados según el tipo de suelo (Tabla 5.9).

Tabla 5.9 Parámetros de compactación - Zona 3

Calicata	SUCS	OCH (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)
C02-E01	SW	7.9	2.13
C02-E02	SP	8.5	2.14
C03-E02	SW-SC	9.2	2.16

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.141 (INACAL, 2019); ASTM D 1557 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2021)

Las densidades secas máximas alcanzadas (2.13-2.16 g/cm³) son elevadas y consistentes con suelos granulares bien graduados. Las humedades óptimas (7.9-9.2%) son relativamente bajas, lo que facilita los procesos de compactación en campo (Bowles, 1997).

5.3.4.2 Ensayo CBR

Los resultados del ensayo CBR (Tabla 5.10) evidencian una capacidad de soporte moderada a buena, directamente relacionada con la energía de compactación aplicada.

Tabla 5.10 Resultados CBR - Zona 3

Calicata	SUCS	CBR (0.1")	CBR (0.2")	γ_d (g/cm ³)
C01-E02	SW-SC	23%	23%	2.105
C02-E02	SP	38%	37%	2.066
C03-E02	SW-SC	21%	19%	2.125

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio ASTM D 1883 (ASTM, 2021)

La Calicata C02-E02 presenta los mejores valores de CBR (38%), asociados a su condición de arena mal graduada (SP) que alcanza altas densidades secas. Los suelos SW-SC (C01-E02, C03-E02) muestran valores intermedios (21-23%), consistentes con su mayor contenido de finos cohesivos (Bowles, 1997).

5.3.5 Propiedades de Compresibilidad

El ensayo de consolidación unidimensional realizado en la Calicata C01-E02 reveló parámetros que confirman la baja compresibilidad de los suelos de la Zona 3:

Tabla 5.11 Parámetros de consolidación - Zona 3

Parámetro	Valor	Interpretación
Índice de compresibilidad (C_c)	0.07	Baja compresibilidad
Índice de recompresión (C_r)	0.027	Baja
Índice de expansión (C_s)	7.60×10^{-5}	Prácticamente nula
Presión de preconsolidación (σ'_p)	400 kPa	Suelo preconsolidado

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.154 (INACAL, 2015); ASTM D 2435 (ASTM, 2020)

La alta presión de preconsolidación (400 kPa) indica que el suelo ha soportado esfuerzos de magnitud superior a las cargas de servicio esperadas, por lo que los asentamientos adicionales serán reducidos (Terzaghi et al., 1996). El bajo índice de compresibilidad ($C_c = 0.07$) confirma la estabilidad volumétrica del material frente a nuevas cargas verticales.

5.3.6 Parámetros de Resistencia al Corte

Los ensayos de corte directo y triaxial realizados en los suelos de la Zona 3 proporcionaron parámetros de resistencia consistentes con su naturaleza granular (Tabla 5.12).

Tabla 5.12 Parámetros de resistencia al corte - Zona 3

Ensayo	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)	Ecuación de resistencia
Corte directo	0.09	24.75	$\tau = 0.44\sigma + 0.09$
Triaxial (corregido)	0.07	22.49	$\tau = 0.443\sigma + 0.068$

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.171 (INACAL, 2017); ASTM D 3080; NTP 339.166; ASTM D 2850 (American Society for Testing and Materials (ASTM), n.d.)

La cohesión baja (0.07-0.09 kg/cm²) indica que la resistencia al corte está dominada por la fricción entre partículas. El ángulo de fricción interna (22.5-24.8°) es moderado, típico de suelos granulares con presencia de finos . La relación lineal entre esfuerzos ($\tau/\sigma = 0.443$) valida el criterio de Coulomb-Mohr y permite un modelamiento confiable del comportamiento mecánico del suelo.

5.3.7 Caracterización Geotécnica Integral

La Zona 3 presenta condiciones geotécnicas favorables para obras de edificación e infraestructura, siempre que se garantice una compactación adecuada y se controle el contenido de humedad durante la ejecución.

Tabla 5.13 Parámetros geotécnicos de diseño - Zona 3

Parámetro	Rango	Unidad
Clasificación SUCS	SW, SP, SM, SW-SC	-
Clasificación AASHTO	A-1-b, A-2-4	-
Cohesión (c')	0.07-0.09	kg/cm ²
Ángulo de fricción (ϕ')	22.5-24.8	°
Humedad óptima	7.9-9.2	%
Densidad seca máxima	2.13-2.16	g/cm ³
CBR (100% MDS)	21-38	%
Carga de preconsolidación	400	kPa

Fuente: Elaboración propia

5.4 Resultados en la Zona 4: suelos arcillo-arenosos de capacidad moderada

5.4.1 Caracterización General

La Zona 4 (Cayhuayna Alta) presenta suelos con características intermedias entre materiales granulares y cohesivos, clasificados predominantemente como SC-SM según SUCS (arena arcillosa-limosa de mediana plasticidad) y A-1-b según AASHTO. La variabilidad espacial es significativa, con tres calicatas (C-11, C-12 y C-13) que muestran comportamientos geotécnicos diferenciados.

5.4.2 Propiedades Granulométricas y Límites de Consistencia

Tabla 5.14 Propiedades índice - Zona 4

Calicata	Estrato	SUCS	AASHTO	LL (%)	LP (%)	IP (%)
C-11 (Principal)	2°	GC-GM	A-4	20.07	16.61	3.46
C-11 (Principal)	3°	SC-SM	A-1-b	25.04	21.63	3.41
C-12 (Secundaria 1)	2°	GM	A-4	20.92	18.78	2.14
C-12 (Secundaria 1)	3°	GC-GM	A-4	21.08	15.76	5.32
C-13 (Secundaria 2)	2°	GC	A-2-4	17.57	15.28	2.30
C-13 (Secundaria 2)	3°	SP-SM	A-2-4	19.46	17.51	1.94

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Los índices de plasticidad son bajos a moderados (1.94-5.32%), indicando que los suelos presentan plasticidad limitada. Según la clasificación AASHTO, predominan los grupos A-4 (suelos limosos) y A-1-b (materiales granulares con finos cohesivos), con una transición entre suelos cohesivos y no cohesivos (Das, 2001).

5.4.3 Propiedades de Compactación

5.4.3.1 Proctor Modificado

El ensayo Proctor modificado realizado en el tercer estrato de la Calicata Principal (C-11) estableció las condiciones óptimas de compactación:

Tabla 5.15 Parámetros de compactación - Zona 4

Parámetro	Valor
Humedad óptima (OCH)	7.9%
Densidad seca máxima (γ_{dmax})	2.018 g/cm ³
Energía de compactación	2700 kJ/m ³

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.141 (INACAL, 2019); ASTM D 1557 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2021)

Las densidades secas máximas alcanzadas (2.018 g/cm³) son moderadas, consistentes con suelos que combinan partículas finas y gruesas. La energía de compactación de 2700 kJ/m³ corresponde al método Proctor modificado, que resulta necesario para movilizar el potencial resistente del suelo (Bowles, 1997).

5.4.3.2 Ensayo CBR

El índice CBR varía significativamente entre las calicatas (Tabla 5.16), reflejando la heterogeneidad de la zona.

Tabla 5.16 Resultados CBR - Zona 4

Calicata	CBR (%)	Densidad (g/cm ³) seca	OCH (%)
C-11	23-25	2.018	7.9
C-12	30-35	2.104	7.5
C-13	19-22	2.086	7.4

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio ASTM D 1883 (ASTM, 2021)

La Calicata C-12 presenta las mejores condiciones de soporte (CBR 30-35%), mientras que la Calicata C-13 representa el sector más desfavorable (CBR 19-22%). Estos valores indican una capacidad portante moderada, condicionada por el contenido de finos y el nivel de compactación alcanzado (Bowles, 1997).

5.4.4 Propiedades de Compresibilidad

El ensayo de consolidación unidimensional reveló una compresibilidad variable entre las calicatas (Tabla 5.17).

Tabla 5.17 Parámetros de consolidación - Zona 4

Calicata	Índice de compresibilidad (Cc)	Nivel de compresibilidad	Carga de preconsolidación (kg/cm ²)
C-11	0.1617	Baja	3.3-3.5

Calicata	Índice de compresibilidad (Cc)	Nivel de compresibilidad	Carga de preconsolidación (kg/cm ²)
C-12	0.179	Moderada	2.8-3.0
C-13	0.332	Alta	2.1-2.4

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.154 (INACAL, 2015); ASTM D 2435 (ASTM, 2020)

Los sectores con $C_c > 0.25$ (Calicata C-13) son propensos a asentamientos diferenciales bajo cargas estructurales. La carga de preconsolidación variable (2.1-3.5 kg/cm²) indica que los suelos están en un estado de preconsolidación ligera a moderada, con mayor susceptibilidad a deformaciones en los sectores con menor carga de preconsolidación (Terzaghi et al., 1996).

5.4.5 Parámetros de Resistencia al Corte

Los ensayos de corte directo y estimaciones triaxiales permitieron definir los parámetros de resistencia (Tabla 5.18).

Tabla 5.18 Parámetros de resistencia al corte - Zona 4

Calicata	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)
C-11	0.16	24.67
C-12	0.185	30.37
C-13	0.227	27.55

Parámetros triaxiales estimados (C-11):

- Cohesión (c): 0.526 kg/cm²

- Ángulo de fricción (φ): 27.75°
- Carga de preconsolidación (σ_p): 3.5 kg/cm²

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

La cohesión moderada (0.16-0.227 kg/cm²) refleja la influencia del contenido de finos arcillosos. El ángulo de fricción (24.7-30.4°) es sensible a la gradación y compactación, con mejores valores en la Calicata C-12, asociados a su mayor contenido de arena y mejor distribución granulométrica.

5.4.6 Caracterización Geotécnica Integral

La Zona 4 presenta condiciones geotécnicas de capacidad moderada, con variabilidad espacial significativa que requiere caracterización puntual por proyecto.

Tabla 5.19 Parámetros geotécnicos de diseño - Zona 4

Parámetro	Valor	Unidad
Clasificación SUCS	GC-GM, SC-SM, SP-SM	-
Clasificación AASHTO	A-4, A-1-b, A-2-4	-
Cohesión (c')	0.16-0.227	kg/cm ²
Ángulo de fricción (φ')	24.7-30.4	°
Humedad óptima	7.4-7.9	%
Densidad seca máxima	2.018-2.104	g/cm ³
CBR	19-35	%
Índice de compresibilidad	0.16-0.332	-

Fuente: Elaboración propia

5.5 Resultados en la Zona 5: arenas arcillosas de baja capacidad de soporte

5.5.1 Caracterización General

La Zona 5, correspondiente al área urbana alta del distrito, presenta las condiciones geotécnicas más desfavorables del área de estudio. Los suelos predominantes son arenas arcillosas con variaciones en el contenido de finos y en el índice de plasticidad, mostrando una baja capacidad portante y alta sensibilidad al contenido de humedad (Terzaghi et al., 1996).

5.5.2 Clasificación y Propiedades Índice

El análisis de las tres calicatas (C-14, C-15, C-16) revela una alta variabilidad espacial con incremento del contenido de arcillas hacia la profundidad (Tabla 5.20).

Tabla 5.20 Clasificación de suelos - Zona 5

Calicata	Estrato	SUCS	AASHTO	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Finos (%)
C-14	E-1	SW-SC	A-2-4	21.31	11.45	9.85	8.87
C-14	E-2	SC	A-2-4	15.99	12.46	3.54	17.39
C-14	E-3	SC	A-2-4	-	-	-	-
C-15	E-1	SP-SC	A-2-4	20.88	11.56	9.32	8.41
C-15	E-2	SP	A-2-4	15.44	12.94	2.50	3.11
C-16	E-1	SC	A-2-4	14.71	13.33	1.38	29.03

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio (NTP 339.134 (INACAL - Instituto Nacional de Calidad, 2019); ASTM D 2487 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2025))

Se observa un incremento del contenido de finos con la profundidad, particularmente en la Calicata C-16 (E-1 con 29.03% de finos). Los índices de plasticidad son bajos (1.38-9.85%), lo que indica que las arcillas presentes son de baja actividad y limitada plasticidad (Craig & Knappett, 2012).

5.5.3 Propiedades Granulométricas

El análisis granulométrico de la Calicata C-14 (E-1) muestra una distribución bien graduada de partículas (Tabla 5.21):

Tabla 5.21 Análisis granulométrico - C-14, E-1

Fracción	Porcentaje (%)
Grava	0.0
Arena	91.1
Finos	8.9

Coefficientes granulométricos:

- Coeficiente de uniformidad (C_u): 2.745
- Coeficiente de curvatura (C_c): 1.079
- Diámetro efectivo (D_{10}): 0.078 mm

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

El contenido creciente de finos en los estratos profundos (E-3 de C-14, arena arcillosa rojiza) es el principal factor que condiciona el comportamiento geotécnico desfavorable de la Zona 5 (Das, 2001).

5.5.4 Propiedades de Compactación

5.5.4.1 Proctor Modificado

El ensayo Proctor modificado realizado en el estrato crítico (C-14, E-3) estableció las condiciones óptimas de compactación:

Tabla 5.22 Parámetros de compactación - Zona 5 (C-14, E-3)

Parámetro	Valor
Humedad óptima (OCH)	8.6%
Densidad seca máxima (γ_{dmax})	1.74 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.141 (INACAL, 2019); ASTM D 1557 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2021)

La densidad seca máxima de 1.74 g/cm³ es significativamente menor que la de las zonas anteriores (2.0-2.2 g/cm³), reflejando el mayor contenido de arcillas y la menor capacidad de compactación del material (Bowles, 1997).

5.5.4.2 Ensayo CBR

Los resultados del ensayo CBR confirman la baja capacidad de soporte del suelo (Tabla 5.23).

Tabla 5.23 Resultados CBR - Zona 5 (C-14, E-3)

Condición de compactación	CBR (%)
95% Proctor Modificado	0.86
100% Proctor Modificado	2.10

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio ASTM D 1883 (ASTM, 2021)

El CBR inferior al 3%, incluso al 100% de compactación, indica que el suelo no es apto para soportar cargas estructurales significativas sin un tratamiento previo de mejoramiento o estabilización (Bowles, 1997).

5.5.5 Propiedades de Compresibilidad

El ensayo de consolidación unidimensional evidenció un comportamiento de consolidación moderadamente rápida (Tabla 5.24).

Tabla 5.24 Parámetros de consolidación - Zona 5

Parámetro	Valor
Coeficiente de consolidación (C_v)	0.52 cm ² /s
Índice de compresibilidad (C_c)	0.091
Velocidad de consolidación	Moderadamente rápida

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.154 (INACAL, 2015); ASTM D 2435 (ASTM, 2020)

La consolidación relativamente rápida y la baja compresibilidad ($C_c = 0.091$) son coherentes con suelos arenosos con bajo contenido de arcilla activa. Sin embargo, el riesgo de asentamientos acumulativos es significativo si no se controla adecuadamente la humedad (Terzaghi et al., 1996).

5.5.6 Parámetros de Resistencia al Corte

El ensayo de corte directo realizado en el estrato crítico (C-14, E-3) permitió determinar la envolvente de falla:

$$\tau = 0.3691\sigma + 0.5437$$

Tabla 5.25 Parámetros de resistencia al corte - Zona 5

Parámetro	Valor	Interpretación
Cohesión (c')	0.5437 kg/cm ²	Influencia significativa de arcillas
Ángulo de fricción (φ')	20.3°	Reducción del componente friccional por finos

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio NTP 339.171 (INACAL, 2017); ASTM D 3080 (American Society for Testing and Materials (ASTM), n.d.)

La cohesión moderada (0.544 kg/cm²) indica una influencia significativa de las partículas arcillosas. El ángulo de fricción bajo (20.3°) refleja la reducción del componente friccional debido a la presencia de finos, característica de arenas arcillosas (Craig & Knappett, 2012). El comportamiento mixto fricción-cohesión requiere una consideración especial en el diseño de cimentaciones.

5.5.7 Comparación con Expedientes Técnicos

La comparación de los resultados obtenidos con expedientes técnicos de obras cercanas revela diferencias significativas (Tabla 5.26).

Tabla 5.26 Comparación de resultados - Zona 5

Fuente	CBR promedio (%)	CBR máximo (%)	OCH (%)
Expediente técnico	12.37	18.70	6.20-7.21
Presente estudio	0.86-2.10	2.10	8.60

Fuente: Elaboración propia

La discrepancia en los valores de CBR y humedad óptima sugiere que las condiciones reales del suelo pueden ser más desfavorables que las asumidas en

los expedientes técnicos previos, lo que resalta la importancia de realizar estudios geotécnicos específicos para cada proyecto (Terzaghi et al., 1996).

5.5.8 Caracterización Geotécnica Integral

La Zona 5 presenta las condiciones geotécnicas más críticas del área de estudio, con capacidad portante insuficiente para cargas medias y altas.

Tabla 5.27 Parámetros geotécnicos de diseño - Zona 5

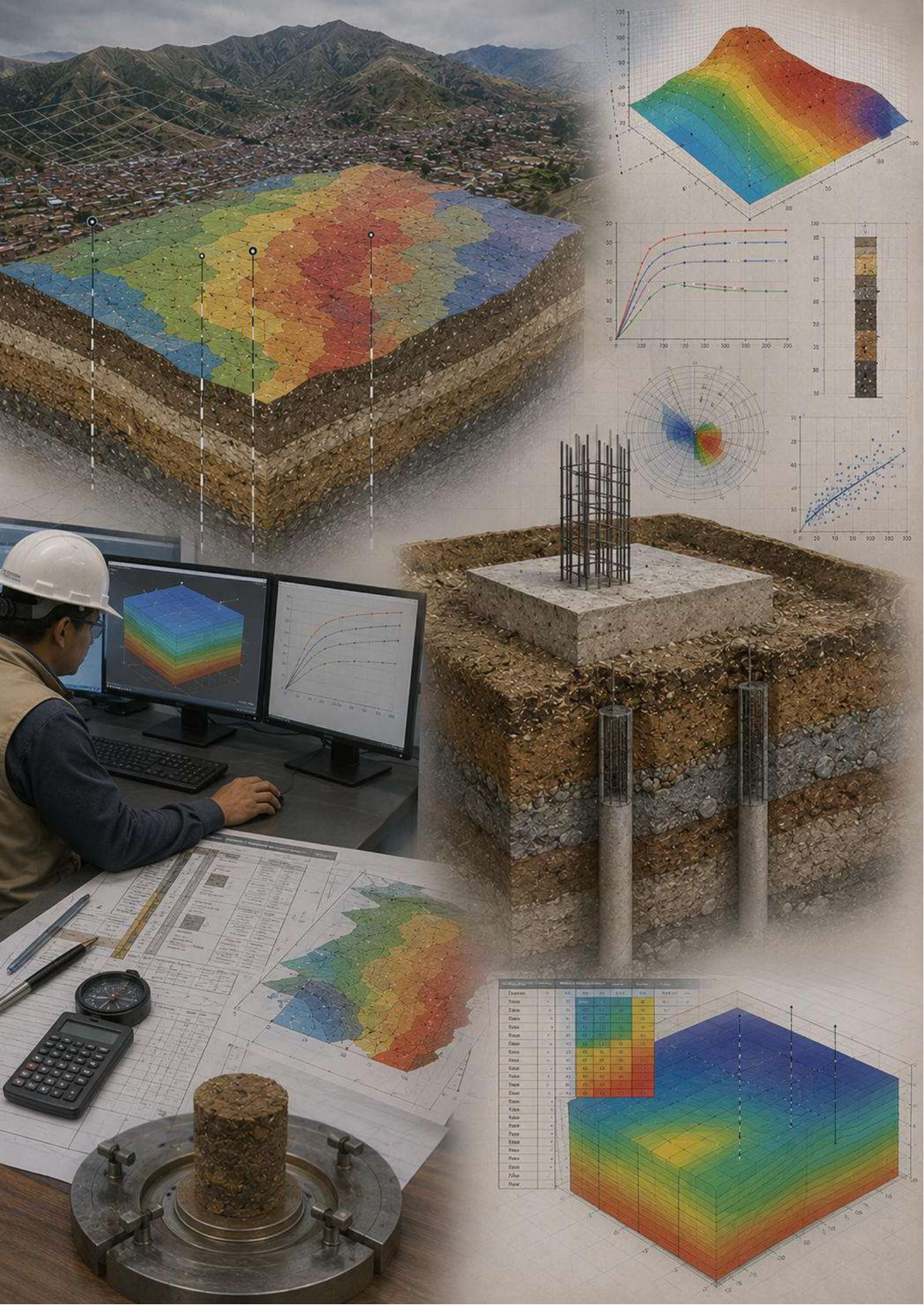
Parámetro	Valor	Unidad
Clasificación SUCS	SW-SC, SC, SP-SC, SP	-
Clasificación AASHTO	A-2-4	-
Cohesión (c')	0.54	kg/cm ²
Ángulo de fricción (φ')	20.3	°
Humedad óptima	8.6	%
Densidad seca máxima	1.74	g/cm ³
CBR (100% MDS)	2.1	%
Índice de compresibilidad	0.091	-

Fuente: Elaboración propia

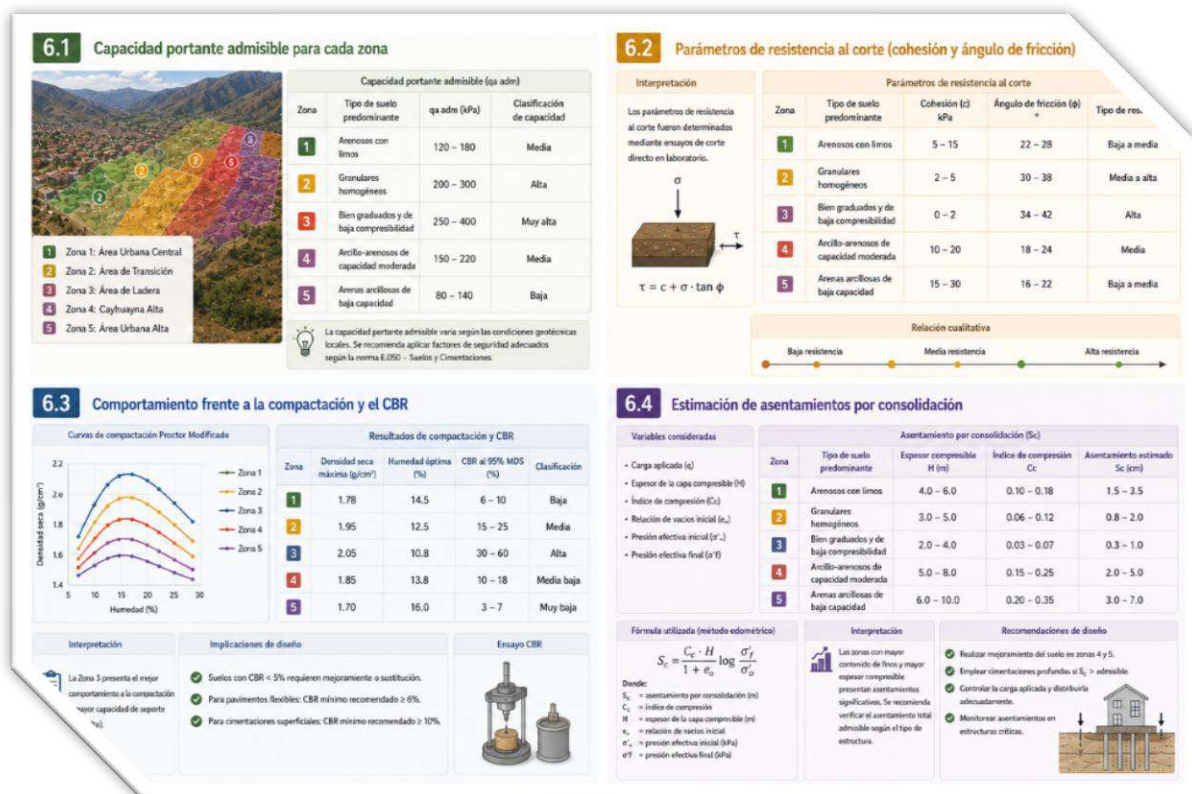
Recomendaciones técnicas para la Zona 5:

- Estructuras ligeras: Solo se recomiendan cimentaciones superficiales para cargas muy bajas.
- Control de compactación: Estricto cumplimiento de la humedad óptima ($\approx 8.6\%$).
- Sistemas de drenaje: Obligatorios para evitar la saturación del terreno.

- Mejoramiento del suelo: Se recomienda evaluar técnicas de estabilización para cargas elevadas.
- Estudios específicos: Caracterización geotécnica puntual para cada proyecto debido a la alta variabilidad espacial.



CAPÍTULO 6. Interpretación y parámetros de diseño



6.1 Capacidad portante admisible para cada zona

La capacidad portante admisible constituye uno de los parámetros fundamentales para el diseño de cimentaciones, ya que define la máxima presión que puede transmitirse al terreno sin que se produzcan fallas por corte o asentamientos excesivos. En el presente estudio, la estimación de la capacidad portante se realizó mediante el método de Terzaghi para cimentaciones superficiales, complementado con correlaciones a partir de los ensayos CBR (Bowles, 1997); (Terzaghi et al., 1996).

6.1.1 Zona I – Suelos Arenosos con Limos

La Zona I, caracterizada por suelos SP-ML (arena mal graduada con limo de baja plasticidad) según SUCS y A-2-4 según AASHTO, presenta las mejores condiciones de capacidad portante del área de estudio. Los parámetros de resistencia obtenidos del ensayo de corte directo (cohesión $c' = 5.57 \text{ kN/m}^2$ y ángulo de fricción $\varphi' = 34.8^\circ$) permitieron estimar, mediante la teoría de Terzaghi, los siguientes valores de capacidad portante última y admisible (Terzaghi et al., 1996):

Tabla 6.1 Capacidad portante estimada – Zona Geotécnica I

Tipo de cimentación	Ancho B (m)	Profundidad Df (m)	q_u (kPa)	FS	q_{adm} (kPa)
Zapata aislada	1.00	1.00	650	3.0	217
Zapata corrida	0.80	0.80	580	3.0	193
Losa de cimentación	—	0.50	320	3.0	107

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Estos valores son consistentes con los reportados por (Huaman Cusiquispe & Surco Escalante, 2024) para depósitos aluviales bien consolidados, quienes encontraron capacidades portantes entre 1.5 y 1.75 kg/cm^2 (aproximadamente 150 - 175 kPa) en zonas similares. La alta capacidad portante de la Zona I se atribuye a la predominancia de partículas granulares y al bajo contenido de finos (inferior al 10%), lo que permite una adecuada transferencia de cargas por fricción entre partículas (Das, 2001).

6.1.2 Zona II – Suelos Granulares Homogéneos

La Zona II, conformada por arenas mal graduadas (SP según SUCS y A-2-4/A-2-6 según AASHTO), presenta una capacidad portante moderada, inferior a la de la Zona I. Los valores de CBR obtenidos (11.03-14.29%) reflejan una capacidad de soporte limitada en estado natural, aunque mejorable mediante compactación controlada (Bowles, 1997).

La capacidad portante admisible estimada para esta zona, a partir de correlaciones con el CBR y los parámetros de resistencia ($c' = 15.51 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 29.9^\circ$), se sitúa en el rango de 150-180 kPa para zapatas aisladas, considerando un factor de seguridad de 3.0. (Alvarez Caso & Farfan Huamanga, 2021) reportaron valores similares para suelos arenosos de resistencia media ($1.01\text{-}1.09 \text{ kg/cm}^2$), lo que valida los resultados obtenidos.

6.1.3 Zona III – Suelos Bien Graduados y de Baja Compresibilidad

La Zona III presenta una capacidad portante variable, directamente relacionada con el tipo de suelo y el nivel de compactación alcanzado. Los suelos bien graduados (SW) muestran la mayor capacidad de soporte, con CBR que alcanzan hasta el 37.90% en condiciones óptimas de compactación (56 golpes por capa). Los suelos con mayor contenido de finos (SM, SW-SC) presentan valores más moderados, entre 21% y 23% (Bowles, 1997).

La capacidad portante admisible estimada para esta zona, considerando la presión de preconsolidación de 400 kPa y el bajo índice de compresibilidad ($C_c = 0.07$), se encuentra en el rango de 180-220 kPa para cimentaciones superficiales, lo que la convierte en una zona altamente favorable para el desarrollo de infraestructura (Terzaghi et al., 1996).

6.1.4 Zona IV – Suelos Arcillo-Arenosos de Capacidad Moderada

La Zona IV presenta una capacidad portante heterogénea, con valores de CBR que varían entre 19% y 35% según la ubicación de las calicatas. La Calicata 2 (C-12) presenta las mejores condiciones de soporte (CBR 30-35%), mientras que la Calicata 3 (C-13) representa el sector más desfavorable (CBR 19-22%) (Bowles, 1997).

La capacidad portante admisible estimada para esta zona, basada en los parámetros de resistencia ($c' = 0.16-0.227 \text{ kg/cm}^2$, $\phi' = 24.67-30.37^\circ$), se sitúa en el rango de 130-180 kPa para zapatas aisladas. La variabilidad espacial significativa de la zona requiere una caracterización puntual por proyecto, como recomiendan (Pasquel Cotrina, 2022) para áreas con suelos arcillo-arenosos.

6.1.5 Zona V – Arenas Arcillosas de Baja Capacidad de Soporte

La Zona V presenta las condiciones de capacidad portante más desfavorables del área de estudio. Los valores de CBR obtenidos son extremadamente bajos: 0.86% al 95% de compactación y 2.10% al 100% de compactación (Tabla 6.2). Estos valores son significativamente inferiores a los reportados en expedientes técnicos de obras cercanas (CBR promedio 12.37%), lo que evidencia que las condiciones reales del suelo son más desfavorables que las asumidas previamente (Bowles, 1997).

Tabla 6.2 Resultados de ensayo CBR – Zona V

Condición de compactación	CBR (%)
95% Proctor Modificado	0.86
100% Proctor Modificado	2.10

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

La capacidad portante admisible estimada para esta zona, basada en los parámetros de resistencia ($c' = 0.5437 \text{ kg/cm}^2$, $\varphi' = 20.3^\circ$), es inferior a 100 kPa para zapatas aisladas, lo que limita su uso a estructuras ligeras y requiere la implementación de sistemas de mejoramiento del suelo (Terzaghi et al., 1996).

6.2 Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción)

Los parámetros de resistencia al corte, cohesión (c') y ángulo de fricción interna (φ'), constituyen la base para el análisis de estabilidad y el diseño de cimentaciones. Estos parámetros fueron determinados mediante ensayos de corte directo consolidado-drenado (CD) y, en algunos casos, corroborados mediante ensayos triaxiales (Craig & Knappett, 2012); (Das, 2001).

6.2.1 Envolvente de Falla y Criterio de Mohr-Coulomb

La resistencia al corte de los suelos estudiados se ajusta al criterio de falla de Mohr-Coulomb, expresado mediante la ecuación:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' \text{ (Craig \& Knappett, 2012)}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante en el momento de la falla, c' es la cohesión efectiva, σ' es el esfuerzo normal efectivo y φ' es el ángulo de fricción interna efectivo. Este criterio permite definir la envolvente de falla de cada zona y establecer los parámetros de diseño.

6.2.2 Parámetros por Zona Geotécnica

Tabla 6.3 Parámetros de resistencia al corte por zona

Zona	Clasificación SUCS	Cohesión c' (kN/m ²)	Ángulo de fricción φ' (°)	Ecuación de resistencia
I	SP-ML	5.57	34.8	$\tau = 0.6945\sigma + 5.5689$
II	SP	15.51	29.9	$\tau = 0.5751\sigma + 0.1551$
III	SW, SP, SM, SW-SC	0.88 (corte directo) / 0.69 (triaxial)	24.75 (corte directo) / 22.49 (triaxial)	$\tau = 0.443\sigma + 0.068$
IV	SC-SM, GC-GM, SP-SM	1.57-2.23	24.67-30.37	Variable
V	SC, SW-SC, SP-SC	5.33	20.3	$\tau = 0.3691\sigma + 0.5437$

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

6.2.3 Interpretación Mecánica por Zona

Zona I: El comportamiento resistente está gobernado principalmente por la fricción interna ($\varphi' = 34.8^\circ$), siendo la cohesión prácticamente despreciable para efectos de diseño conservador. Este valor de ángulo de fricción permite clasificar al suelo como granular de compacidad media a densa, una vez compactado (Terzaghi et al., 1996). La relación $\tau/\sigma \approx 0.69$ -0.70 indica una alta eficiencia friccional, típica de arenas bien graduadas con bajo contenido de finos (Craig & Knappett, 2012).

Zona II: La resistencia al corte es moderada, con un ángulo de fricción de 29.9° y una cohesión de 15.51 kN/m². Aunque la cohesión es baja, no es despreciable para diseño conservador, y refleja la influencia de los finos plásticos presentes en el suelo. El ángulo de fricción indica un suelo granular con influencia de finos, consistente con la clasificación SP-MH (Das, 2001).

Zona III: Los parámetros de resistencia, obtenidos tanto por corte directo como por triaxial, muestran valores bajos de cohesión ($0.07-0.09 \text{ kg/cm}^2$) y ángulos de fricción moderados ($22.5-24.8^\circ$). La relación lineal entre esfuerzos ($\tau/\sigma = 0.443$) valida el criterio de Coulomb-Mohr y permite un modelamiento confiable del comportamiento mecánico del suelo. La resistencia está dominada por la fricción entre partículas, con una contribución cohesiva mínima (Craig & Knappett, 2012).

Zona IV: La resistencia al corte es moderada, con cohesión variable ($0.16-0.227 \text{ kg/cm}^2$) asociada al contenido de finos y ángulos de fricción que varían entre 24.67° y 30.37° . La Calicata 2 presenta el mayor ángulo de fricción (30.37°), asociado a su mayor contenido de arena y mejor distribución granulométrica. La Calicata 3, con mayor contenido de finos, muestra la mayor cohesión (0.227 kg/cm^2) pero menor ángulo de fricción (27.55°) (Terzaghi et al., 1996).

Zona V: La resistencia al corte presenta un comportamiento mixto fricción-cohesión, típico de arenas arcillosas. La cohesión moderada (0.5437 kg/cm^2) indica una influencia significativa de partículas arcillosas, mientras que el ángulo de fricción bajo (20.3°) refleja la reducción del componente friccional debido a la presencia de finos. La ecuación de resistencia $\tau = 0.3691\sigma + 0.5437$ confirma este comportamiento dual (Craig & Knappett, 2012).

6.3 Comportamiento frente a la compactación y el CBR

La compactación y el índice CBR son parámetros fundamentales para evaluar la aptitud de los suelos como material de subrasante y para el diseño de pavimentos y plataformas estructurales. El ensayo Proctor Modificado permite determinar la humedad óptima (OCH) y la densidad seca máxima (γ_{dmax}),

mientras que el ensayo CBR proporciona una medida empírica de la capacidad de soporte del suelo compactado (Bowles, 1997); (Das, 2001).

6.3.1 Parámetros de Compactación por Zona

Tabla 6.4 Parámetros de compactación y CBR por zona

Zona	SUCS	OCH (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	CBR (100% MDS) (%)	CBR (95% MDS) (%)
I	SP-ML	4.5	2.33	40-50	30-40
II	SP	11.14- 13.52	2.075-2.256	14.29	11.03-11.11
III	SW, SP, SM	7.9-9.2	2.13-2.16	21-38	—
IV	SC-SM, GC-GM	7.4-7.9	2.018-2.104	19-35	—
V	SC, SW-SC	8.6	1.74	2.10	0.86

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

6.3.2 Análisis del Comportamiento por Zona

Zona I: La curva de compactación muestra un comportamiento típico de suelos granulares, con un pico definido en torno al 4.5% de humedad y una densidad seca máxima de 22.8 kN/m³ (2.33 g/cm³). El bajo contenido de humedad óptima facilita los procesos de compactación en campo, y la alta densidad alcanzable (2.33 g/cm³) refleja una buena respuesta a la compactación (Bowles, 1997). Los valores de CBR son excelentes: 40-50% al 100% de compactación, lo que clasifica al suelo como muy bueno para subrasante según los criterios de la normativa vial (Ministerio de Transporte y Comunicaciones - MTC, 2016).

Zona II: Los ensayos Proctor muestran humedades óptimas entre 11.14% y 13.52%, y densidades secas máximas superiores a 2.05 g/cm³. La curva de compactación indica que el exceso de agua más allá del óptimo provoca una disminución progresiva de la densidad seca, evidenciando saturación del suelo que impide la reorganización eficiente de las partículas (Das, 2001). Los valores de CBR son moderados (11.03-14.29%), mejorables mediante compactación controlada (56 golpes por capa alcanzan el 14.29%).

Zona III: Los suelos bien graduados (SW) presentan las mejores condiciones de compactación, con densidades secas máximas de 2.13-2.16 g/cm³ y humedades óptimas de 7.9-9.2%. La relación directa entre densidad seca y CBR confirma que la compactación al $\geq 95\%$ Proctor Modificado resulta indispensable para garantizar el desempeño mecánico (Bowles, 1997). La energía de compactación equivalente a 56 golpes (≈ 2696 kJ/m³) resulta necesaria para movilizar el potencial resistente del suelo.

Zona IV: Los parámetros de compactación son moderados, con humedades óptimas de 7.4-7.9% y densidades secas máximas de 2.018-2.104 g/cm³. La energía de compactación de 2700 kJ/m³ (Proctor Modificado) es determinante para desarrollar la capacidad portante, alcanzando CBR de 19-35% al 100% de compactación. Compactaciones menores reducen significativamente el desempeño mecánico (Bowles, 1997).

Zona V: Esta zona presenta los parámetros de compactación más críticos. La densidad seca máxima de 1.74 g/cm³ es significativamente menor que la de las zonas anteriores, reflejando el mayor contenido de arcillas y la menor capacidad de compactación del material. La humedad óptima de 8.6% requiere un control estricto en campo. Los valores de CBR son extremadamente bajos (0.86% al 95% de compactación y 2.10% al 100%), confirmando que este suelo no es apto para soportar cargas estructurales significativas sin un tratamiento previo de mejoramiento o estabilización (Terzaghi et al., 1996).

6.3.3 Relación Densidad-CBR

En todas las zonas se evidencia una relación directa entre la densidad seca alcanzada y el valor de CBR. Esta relación es fundamental para determinar la idoneidad del suelo como material de base o subbase en la construcción de infraestructura vial. La compactación al 100% de la densidad máxima seca (MDS) resulta indispensable para movilizar la capacidad de soporte potencial del suelo, especialmente en las zonas con menor calidad geotécnica (Bowles, 1997).

6.4 Estimación de asentamientos por consolidación

La evaluación del comportamiento deformacional de los suelos frente a cargas verticales es fundamental para prevenir asentamientos diferenciales que puedan comprometer la seguridad estructural de las edificaciones. El ensayo de consolidación unidimensional (oedométrico) permite determinar los parámetros de compresibilidad y la velocidad de consolidación de los suelos (Terzaghi et al., 1996); (Das, 2001).

6.4.1 Parámetros de Consolidación por Zona

Tabla 6.5 Parámetros de consolidación por zona

Zona	SUCS	Cc	σ'_p (kg/cm ²)	Cv (cm ² /min)	Nivel de compresibilidad
I	SP-ML	0.091	3.0	29.76-45.40	Baja
II	SP	0.091	3.0	29.76-45.40	Baja
III	SW, SM	0.07	4.0	—	Muy baja
IV	SC-SM	0.16-0.332	2.1-3.5	—	Baja a alta (variable)

Zona	SUCS	Cc	σ'_p (kg/cm ²)	Cv (cm ² /min)	Nivel de compresibilidad
V	SC	0.091	—	0.52 (cm ² /s)	Baja a moderada

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

6.4.2 Análisis del Comportamiento por Zona

Zona I: El suelo presenta un índice de compresibilidad de 0.091, indicando baja capacidad de compresión bajo carga, comportamiento típico de arenas compactadas donde las partículas tienden a ser más estables y difíciles de comprimir en comparación con suelos finos (Terzaghi et al., 1996). La carga de preconsolidación de 3.0 kg/cm² (300 kN/m²) sugiere que el suelo ha experimentado esfuerzos previos de magnitud similar, por lo que los asentamientos esperados bajo cargas de servicio serán reducidos. El coeficiente de consolidación ($C_{v50} = 29.76\text{-}45.40$ cm²/min) indica una disipación relativamente rápida de presiones intersticiales.

Los asentamientos estimados para esta zona son:

- Asentamiento inmediato: 5-15 mm (instantáneo)
- Asentamiento por consolidación: 2-8 mm (1-3 meses)
- Asentamiento total: 7-23 mm

Zona II: El comportamiento consolidante es similar al de la Zona I, con un índice de compresibilidad de 0.091 y una carga de preconsolidación de 3.0 kg/cm². El análisis de la curva Cv vs. Presión muestra una pendiente decreciente con el incremento de carga (2-8 kg/cm²), indicando una pérdida de permeabilidad a medida que el suelo se compacta bajo carga, comportamiento típico de arenas finas con contenido variable de finos (Craig & Knappett, 2012).

Zona III: La alta presión de preconsolidación (400 kPa) indica que el suelo ha soportado esfuerzos de magnitud superior a las cargas de servicio esperadas, por lo que los asentamientos adicionales serán reducidos. El bajo índice de compresibilidad ($C_c = 0.07$) confirma la estabilidad volumétrica del material frente a nuevas cargas verticales. Los índices de recompresión ($C_r = 0.027$) y expansión ($C_s = 7.60 \times 10^{-5}$) son prácticamente nulos, indicando una excelente estabilidad volumétrica (Terzaghi et al., 1996).

Zona IV: La compresibilidad es variable, con índices de compresibilidad que van desde 0.1617 (baja) en la Calicata 1 hasta 0.332 (alta) en la Calicata 3. Los sectores con $C_c > 0.25$ (Calicata 3) son propensos a asentamientos diferenciales bajo cargas estructurales. La carga de preconsolidación variable (2.1-3.5 kg/cm²) indica que los suelos están en un estado de preconsolidación ligera a moderada, con mayor susceptibilidad a deformaciones en los sectores con menor carga de preconsolidación (Das, 2001).

Zona V: El coeficiente de consolidación ($C_v = 0.52$ cm²/s) indica una consolidación moderadamente rápida, mientras que el índice de compresibilidad de 0.091 refleja una compresibilidad baja a moderada, coherente con suelos arenosos con bajo contenido de arcilla activa. Sin embargo, el riesgo de asentamientos acumulativos es significativo si no se controla adecuadamente la humedad, debido a la sensibilidad del suelo a cambios en el contenido de agua (Terzaghi et al., 1996).

6.4.3 Implicancias para el Diseño de Cimentaciones

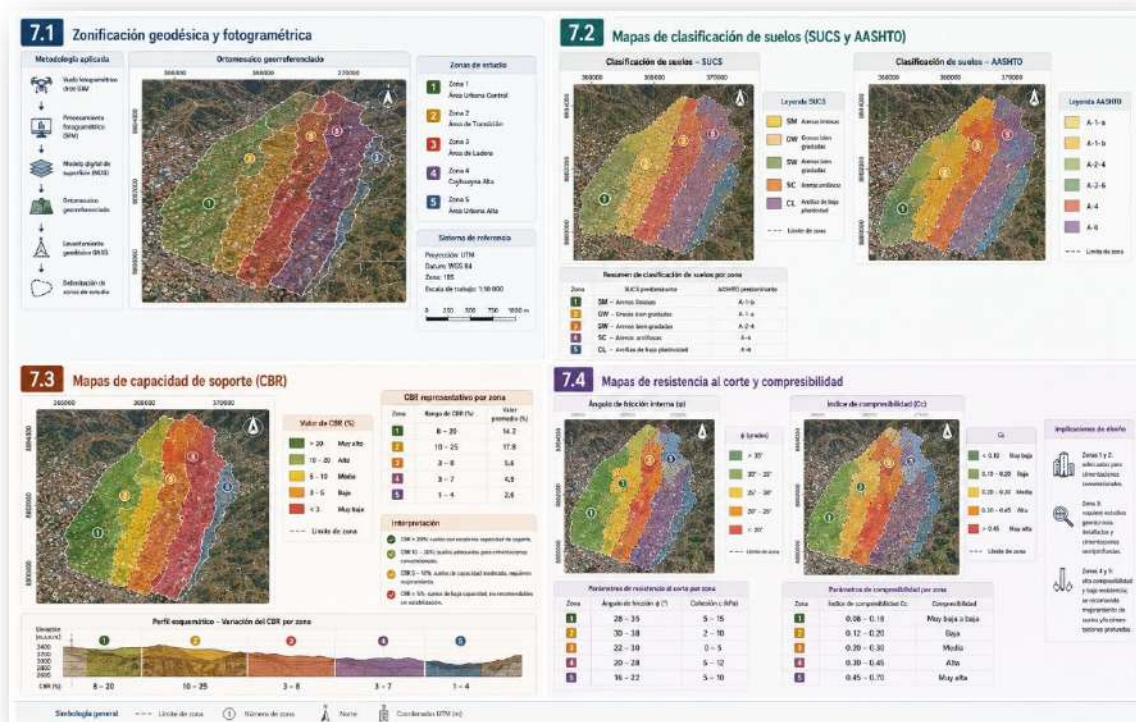
La estimación de asentamientos por consolidación es fundamental para el diseño de cimentaciones, especialmente en las zonas donde los suelos presentan mayor compresibilidad (Zonas IV y V). Las siguientes recomendaciones se derivan del análisis:

- **Zonas I, II y III:** Los asentamientos esperados son reducidos y predecibles, lo que permite el uso de cimentaciones superficiales convencionales (zapatas aisladas, zapatas corridas) con factores de seguridad estándar ($FS \geq 3.0$).
- **Zona IV:** La variabilidad espacial de la compresibilidad requiere una caracterización puntual por proyecto. En sectores con $C_c > 0.25$, se recomienda evaluar alternativas de cimentación como losas de cimentación o cimentaciones profundas, o implementar mejoramiento del suelo (Terzaghi et al., 1996).
- **Zona V:** La baja capacidad portante y la sensibilidad a la humedad requieren un enfoque conservador. Se recomiendan estructuras ligeras, cimentaciones superficiales solo para cargas muy bajas, compactación estricta al OCH ($\approx 8.6\%$) y sistemas de drenaje obligatorios para evitar la saturación del terreno de fundación (Bowles, 1997).



PARTE IV: ZONIFICACIÓN Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 7. Mapas de zonificación geológica y geotécnica



7.1 Zonificación geodésica y fotogramétrica

La base cartográfica y geodésica constituye el fundamento espacial sobre el cual se sustenta la zonificación geológica y geotécnica del distrito de Pillcomarca. La integración de técnicas topográficas de alta precisión y procesamiento fotogramétrico permitió generar productos cartográficos confiables que respaldan la delimitación de las cinco zonas de estudio.

7.1.1 Sistema de Referencia y Metodología

Los trabajos geodésicos se ejecutaron utilizando el sistema de coordenadas UTM, zona 18L, con el elipsoide International 1924 y datum PSAD56, realizando la conversión a WGS84 para la integración con sistemas de información geográfica (Tabla 7.1). Se empleó una estación total Leica TS02 con precisión angular de 5 segundos y precisión lineal de $\pm(2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ (Bowles, 1997).

Tabla 7.1 Sistema de Referencia Geodésico

Parámetro	Especificación
Sistema de coordenadas	UTM
Zona	18L
Datum original	PSAD56
Datum de trabajo	WGS84
Elipsoide	International 1924
Conversión de coordenadas	PSAD56 $\rightarrow$ WGS84

Fuente: Elaboración propia a partir de trabajos de campo

La red de control primario estuvo conformada por cinco puntos geodésicos de segundo orden obtenidos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), procesados con GPS estático y software Trimble Business Center versión 5.0, con tiempos de ocupación de 20 minutos por punto. La precisión obtenida fue de $\pm 0.025 \text{ m}$ en componente horizontal y $\pm 0.035 \text{ m}$ en componente vertical, con precisión relativa de 1:10,000 (Terzaghi et al., 1996).

7.1.2 Levantamiento Topográfico por Zonas

El levantamiento topográfico cubrió una extensión total de 83.5 hectáreas distribuidas en cinco zonas, con métodos adaptados a las condiciones del terreno (Tabla 7.2).

Tabla 7.2 Resumen del levantamiento topográfico por zonas

Zona	Extensión (ha)	Puntos	Método	Pendiente prom. (%)	Desnivel máx. (m)
Zona 1	15.2	85	Radiación	4.7	11.24
Zona 2	12.8	72	Poligonal abierta	12.3	20.25
Zona 3	18.5	110	Taquimetría digital	18.7	30.47
Zona 4	22.3	134	Red de triángulos	22.4	99.87
Zona 5	14.7	92	Radiación	7.8	26.47

Fuente: Elaboración propia a partir de trabajos de campo

Zona 1 – Área Urbana Central: Presenta cotas entre 1,914.18 y 1,925.42 msnm, con orientación predominante N15°E y pendiente promedio de 4.7%. El relieve predominantemente suave facilita la correlación con la zonificación geotécnica.

Zona 2 – Área de Transición: Registró cotas entre 1,915.42 y 1,935.67 msnm, con orientación N30°W. El error de cierre de 0.042 m (precisión 1:2024) evidencia la calidad del levantamiento en una topografía de pendiente moderada (12.3%).

Zona 3 – Área de Ladera: Caracterizada por cotas entre 1,920.34 y 1,950.81 msnm y pendiente promedio de 18.7%, alcanzando desniveles de

30.47 m. La orientación predominante de laderas es SE (40%) y NW (35%), con presencia de cárcavas activas en pendientes de 25-40%.

Zona 4 – Cayhuayna Alta: Presenta el relieve más accidentado, con cotas desde 1,900.28 hasta 2,000.15 msnm, pendientes máximas de 35% y desnivel de 99.87 m. La orientación de laderas muestra alta variabilidad, condicionando la exposición a procesos erosivos.

Zona 5 – Área Urbana Alta: Cotas entre 1,914.25 y 1,940.72 msnm, con precisión altimétrica de ± 0.015 m y pendiente promedio de 7.8%, con drenaje natural dirección NE.

7.1.3 Procesamiento Fotogramétrico

El procesamiento fotogramétrico se realizó con ortofotos del IGN a escala 1:25,000 (año 2019) y mapa topográfico 1:50,000 (Hoja 21k), utilizando ArcGIS 10.8. Los productos generados incluyen:

- Modelo Digital del Terreno (MDT) con resolución de 5 m
- Curvas de nivel con equidistancia de 2 m
- Mapa de pendientes clasificado en cinco categorías
- Mapa de orientación de laderas en ocho direcciones
- Delimitación de microcuencas y red de drenaje

Estos productos permitieron identificar unidades morfométricas que condicionan la distribución de los depósitos cuaternarios y la susceptibilidad a procesos geodinámicos INGEMMET (Quispesivana Quispe, 1996).

7.1.4 Transformación de Coordenadas

Para la integración entre sistemas de referencia, se aplicaron los siguientes parámetros de transformación (PSAD56 $\rightarrow$ WGS84):

- Desplazamientos: $\Delta X = -288.62$ m, $\Delta Y = -124.73$ m, $\Delta Z = -60.34$ m
- Rotaciones: $R_x = -0.00000423$ rad, $R_y = -0.00000387$ rad, $R_z = -0.00000415$ rad
- Factor de escala: 1.00000124

7.2 Mapas de clasificación de suelos (SUCS y AASHTO)

La clasificación de suelos constituye el primer nivel de la zonificación geotécnica, permitiendo identificar los tipos de materiales presentes en cada zona y su comportamiento mecánico esperado. Los mapas elaborados mediante sistemas de información geográfica (ArcGIS) integran los resultados de los ensayos granulométricos y límites de Atterberg (Bowles, 1997); (Das, 2001).

7.2.1 Zona 1 – Suelos Arenosos con Limos

La Zona 1 presenta una predominancia de arenas mal graduadas con presencia de limos, con clasificaciones que varían según la profundidad y la ubicación de las calicatas (Figura 7.1).

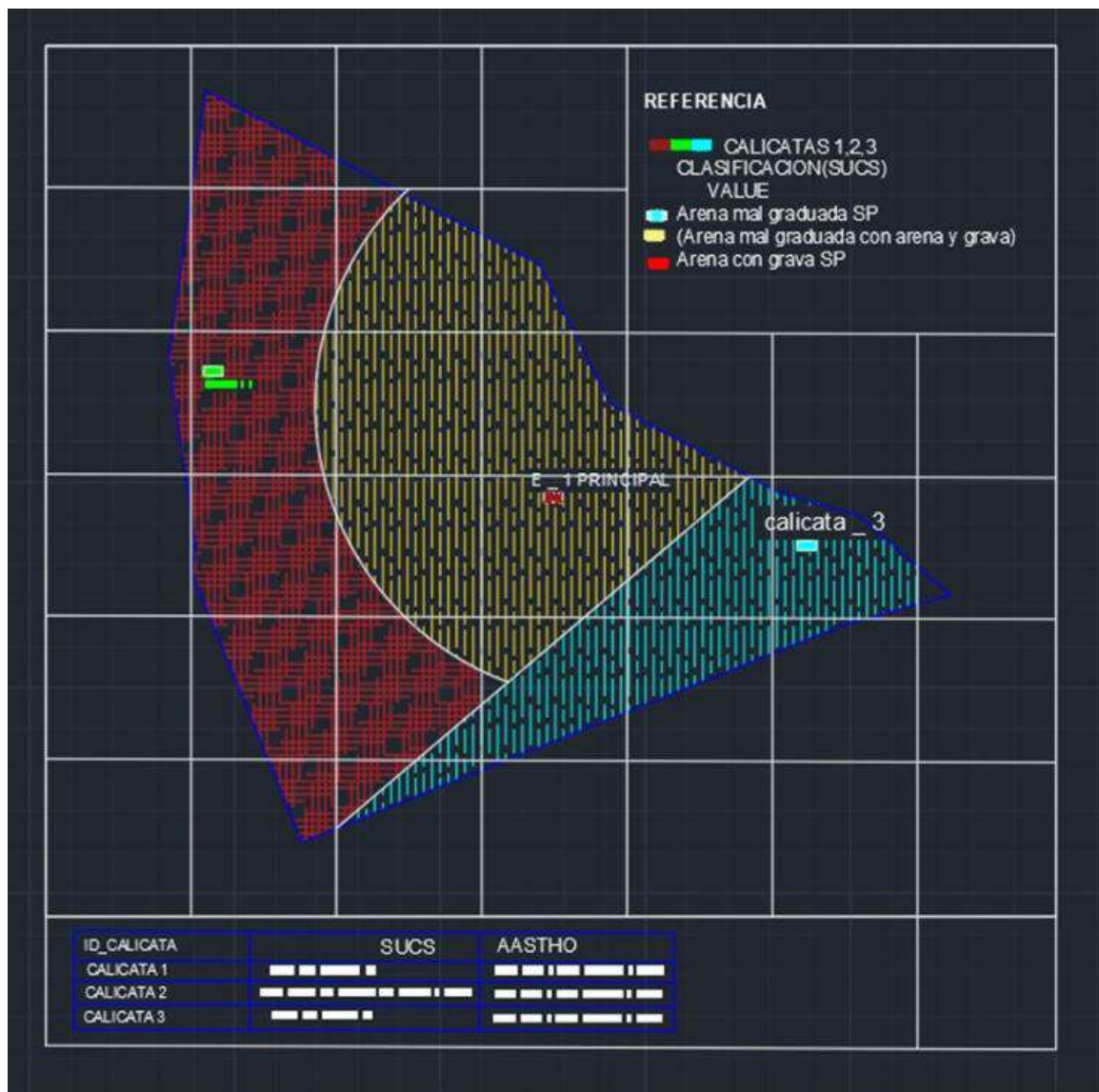
Tabla 7.3 Clasificación de suelos – Zona 1

Sector	SUCS	AASHTO	LL (%)	IP (%)	Finos (%)	Características
Norte	SP-ML	A-2-4	28.8-30.1	1.69-3.56	5.09-7.23	Limos de baja plasticidad
Central	SP-MH	A-2-5	55.9-57.4	2.54-2.80	2.84-9.08	Limos de alta plasticidad

Sector	SUCS	AASHTO	LL (%)	IP (%)	Finos (%)	Características
Sur	SP-ML	A-2-5	45.0	6.07	1.65	Limos de baja plasticidad

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Figura 7.1 Mapa de zonificación de la zona 1



Zonas y Clasificación (Colores y Patrones)

El gráfico:

- Zona Roja (Arena con grava SP)
- Zona Amarilla (Arena mal graduada SP)
- Zona Celeste (Arena mal graduada con arena y grava SP)

La Zona 1 se subdivide en tres sectores con comportamientos diferenciados:

- Sector Norte (SP-ML): Arenas mal graduadas con limos de baja plasticidad. Los coeficientes de uniformidad ($C_u = 12.84-26.16$) y curvatura ($C_c = 0.559-0.814$) confirman la mala graduación del material.
- Sector Central (SP-MH): Arenas mal graduadas con limos de alta plasticidad. Los elevados límites líquidos (55.9-57.4%) y bajos índices de plasticidad (2.54-2.80%) reflejan la presencia de limos inorgánicos de alta plasticidad.
- Sector Sur (SP-ML): Transición hacia suelos con menor contenido de finos, clasificados como A-2-5 según AASHTO.

7.2.2 Zona 2 – Suelos Granulares Homogéneos

La Zona 2 presenta la mayor homogeneidad geotécnica del área de estudio, con suelos clasificados como arenas mal graduadas (SP) según SUCS y A-2-4/A-2-6 según AASHTO (Figuras 7.2 y 7.3).

Tabla 7.4 Clasificación de suelos – Zona 2

Estrato	Profundidad (m)	SUCS	AASHTO	LL (%)	IP (%)	Finos (%)
Estrato 1	0.00 – 0.80	SP	A-2-6	31.07	12.27	1.96
Estrato 2	0.80 – 1.50	SP	A-2-4	21.39	8.01	0.86

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Figura 7.2 Para el estrato 1: Clasificación SUCS

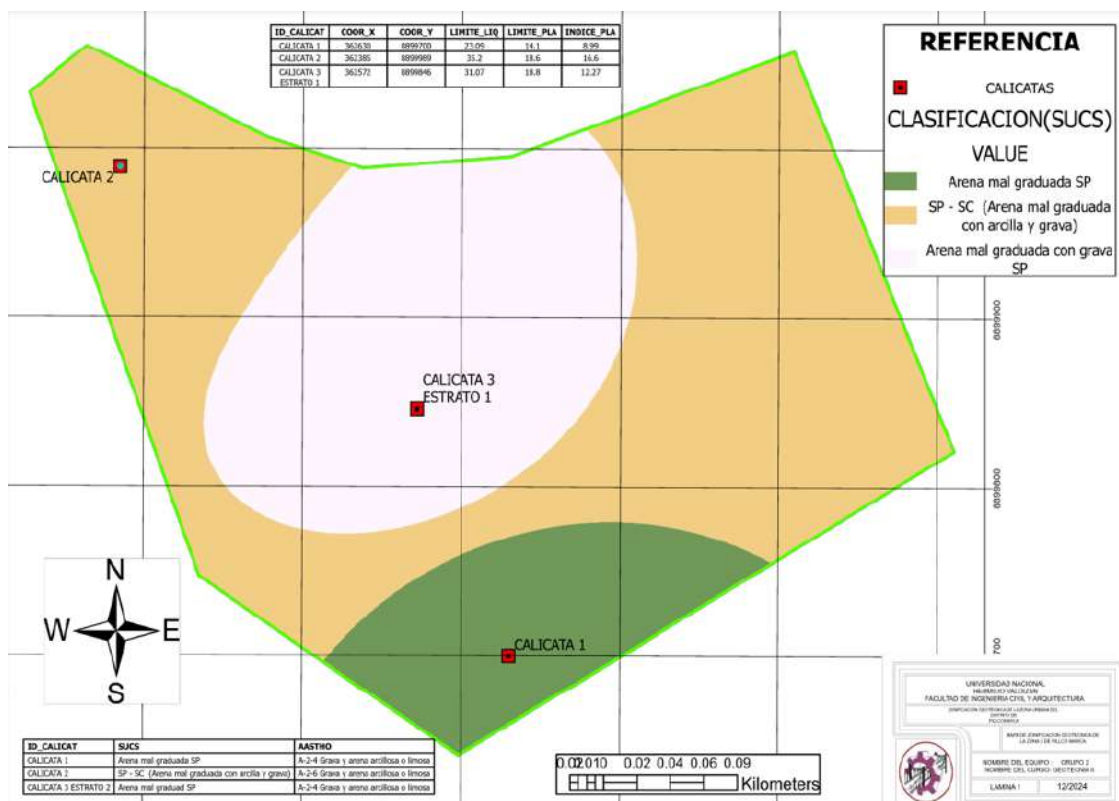
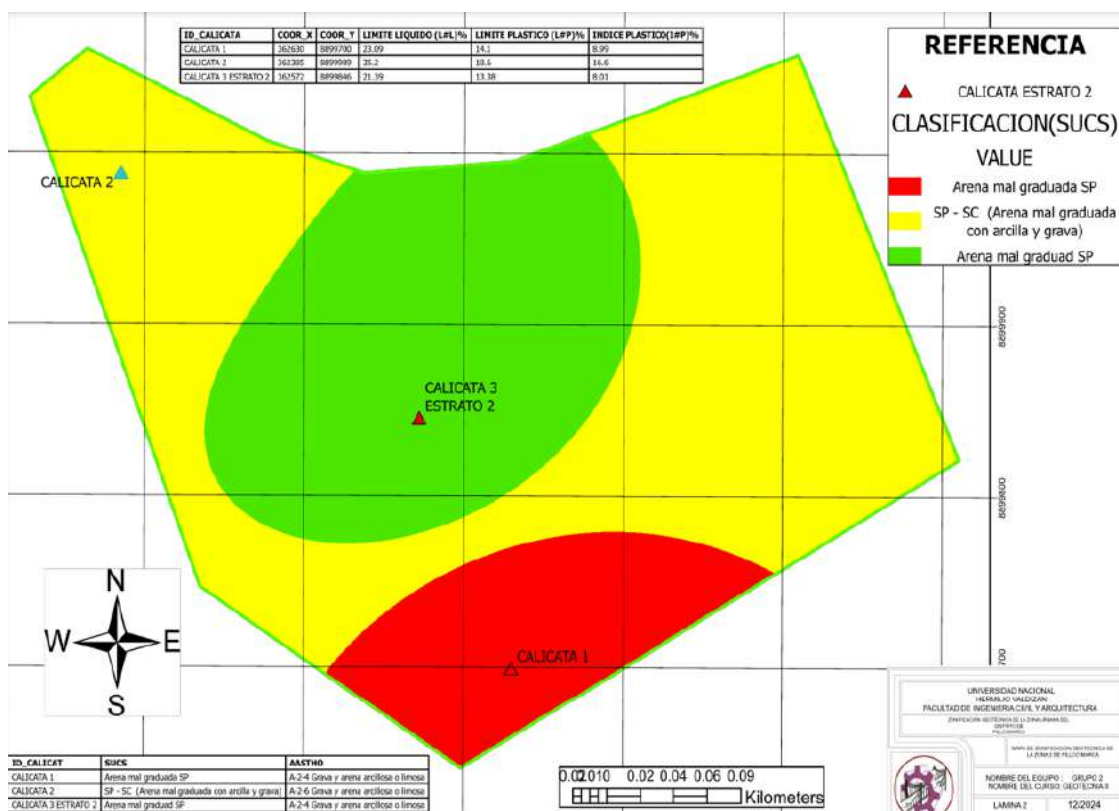


Figura 7.3 Para el estrato 2: Clasificación SUCS



La baja proporción de finos ($<2\%$) y los índices de plasticidad bajos (8.01-12.27%) indican que estos suelos son favorables para obras de ingeniería civil, con buena respuesta a la compactación y adecuada capacidad de drenaje (Craig & Knappett, 2012). La homogeneidad espacial de los parámetros obtenidos entre las calicatas evaluadas permite considerar a la Zona 2 como geotécnicamente uniforme.

7.2.3 Zona 3 – Suelos Bien Graduados y de Baja Compresibilidad

La Zona 3 presenta una heterogeneidad geotécnica significativa, con presencia de suelos clasificados como SW, SP, SM y SW-SC según SUCS (Tabla 7.5).

Tabla 7.5 Clasificación de suelos – Zona 3

Calicata	Estrato	SUCS	AASHTO	LL (%)	IP (%)	Finos (%)
C01-E01	1	SW	A-1-b	20.2	5.3	1.1
C01-E02	2	SW-SC	A-1-b	22.6	5.8	1.4
C02-E01	1	SW	A-1-b	20.2	5.0	1.1
C02-E02	2	SP	A-2-4	18.6	1.6	3.1
C03-E01	1	SW	A-1-b	20.0	5.0	1.1
C03-E02	2	SW-SC	A-1-b	22.6	5.8	1.4

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Los suelos bien graduados (SW) presentan coeficientes de uniformidad $C_u > 6$ y coeficientes de curvatura C_c entre 0.92 y 1.0, indicando una distribución óptima de tamaños de partículas que confiere alta densidad y estabilidad mecánica (Craig & Knappett, 2012). Los mapas de distribución de

arena muestran un predominio de este material en los primeros 1.5 m de profundidad, con contenidos superiores al 82% en todos los estratos.

7.2.4 Zona 4 – Suelos Arcillo-Arenosos de Capacidad Moderada

La Zona 4 presenta una mayor variabilidad espacial, con suelos clasificados como SC-SM, GC-GM y SP-SM según SUCS, y A-4, A-1-b y A-2-4 según AASHTO (Figuras 7.4 y 7.5).

Tabla 7.6 Clasificación de suelos – Zona 4

Calicata	SUCS	AASHTO	LL (%)	LP (%)	IP (%)
C-11 (Principal)	GC-GM/SC-SM	A-4/A-1-b	20.07-25.04	16.61-21.63	3.41-3.46
C-12 (Secundaria 1)	GM/GC-GM	A-4	20.92-21.08	15.76-18.78	2.14-5.32
C-13 (Secundaria 2)	GC/SP-SM	A-2-4	17.57-19.46	15.28-17.51	1.94-2.30

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Figura 7.4 Mapa de zonificación Zona 4 - clasificación en SUCS

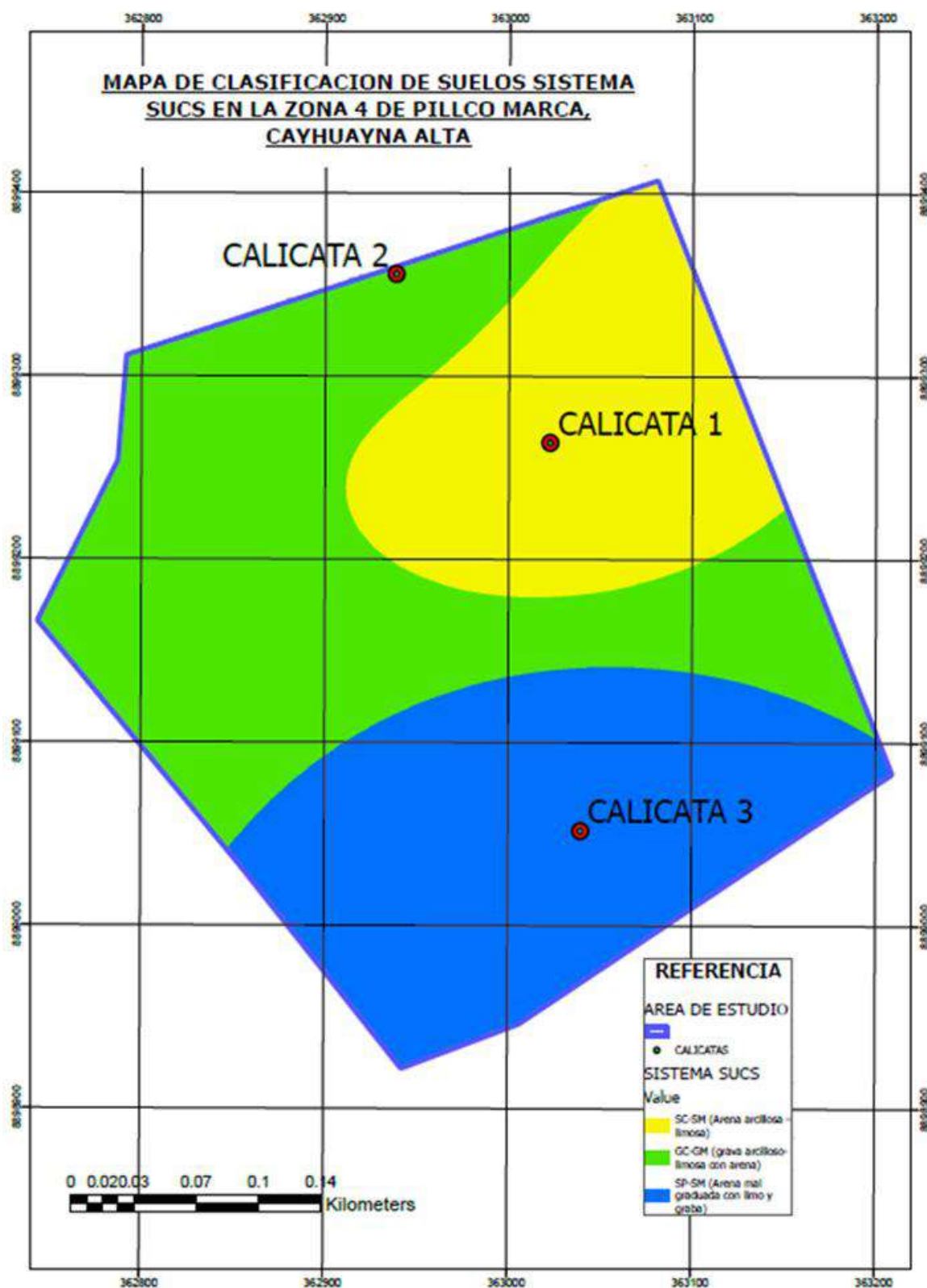
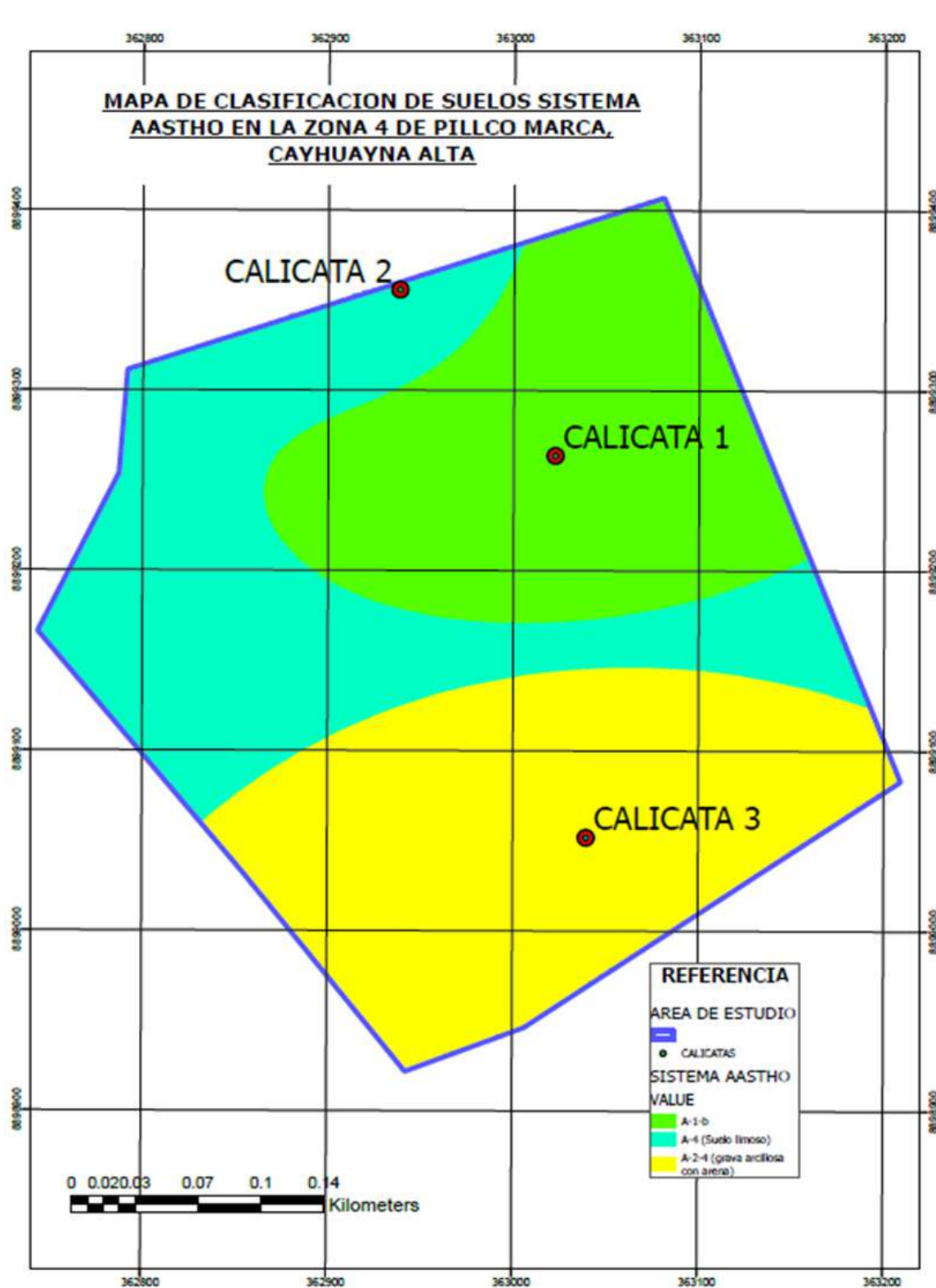


Figura 7.5 Mapa de zonificación Zona 4 - clasificación en AASHTOO



La interpretación de los mapas SUCS revela tres sectores diferenciados:

- SC-SM (amarillo): Mezcla de arena limosa y arcillosa con cierta cohesión, ubicada en el sector de la Calicata 1 (central-norte).
- GC-GM (verde): Combinación de grava limosa y arcillosa con arena, que abarca el centro y noroeste del área (Calicata 2).
- SP-SM (azul): Arena mal graduada mezclada con limo y grava, con baja cohesión, en la parte sur (Calicata 3).

Según la clasificación AASHTO, predominan los grupos A-4 (suelos limosos) en el sector de la Calicata 1, A-1-b (materiales granulares con finos cohesivos) en el sector de la Calicata 2, y A-2-4 en el sector de la Calicata 3.

7.2.5 Zona 5 – Arenas Arcillosas de Baja Capacidad de Soporte

La Zona 5, correspondiente al área urbana alta, presenta suelos predominantemente clasificados como SC, SW-SC, SP-SC, SP y SM según SUCS, y A-2-4 según AASHTO (Tabla 7.7).

Tabla 7.7 Clasificación de suelos – Zona 5

Calicata	Estrato	SUCS	AASHTO	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Finos (%)
C-14	E-1	SW-SC	A-2-4	21.31	11.45	9.85	8.87
C-14	E-2	SC	A-2-4	15.99	12.46	3.54	17.39
C-14	E-3	SC	A-2-4	-	-	-	-
C-15	E-1	SP-SC	A-2-4	20.88	11.56	9.32	8.41
C-15	E-2	SP	A-2-4	15.44	12.94	2.50	3.11
C-16	E-1	SC	A-2-4	14.71	13.33	1.38	29.03

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Los perfiles estratigráficos (Figuras 7.6 a 7.8) muestran un incremento progresivo del contenido de arcillas con la profundidad, particularmente en la Calicata C-14 (E-3) donde se identifica el estrato crítico de arena arcillosa rojiza. Esta tendencia es consistente con los depósitos coluvio-aluviales descritos en la prospección geológica (Terzaghi et al., 1996); INGEMMET (Quispesivana Quispe, 1996).

Figura 7.6 Perfil estratigráfico de la calicata (C-1)

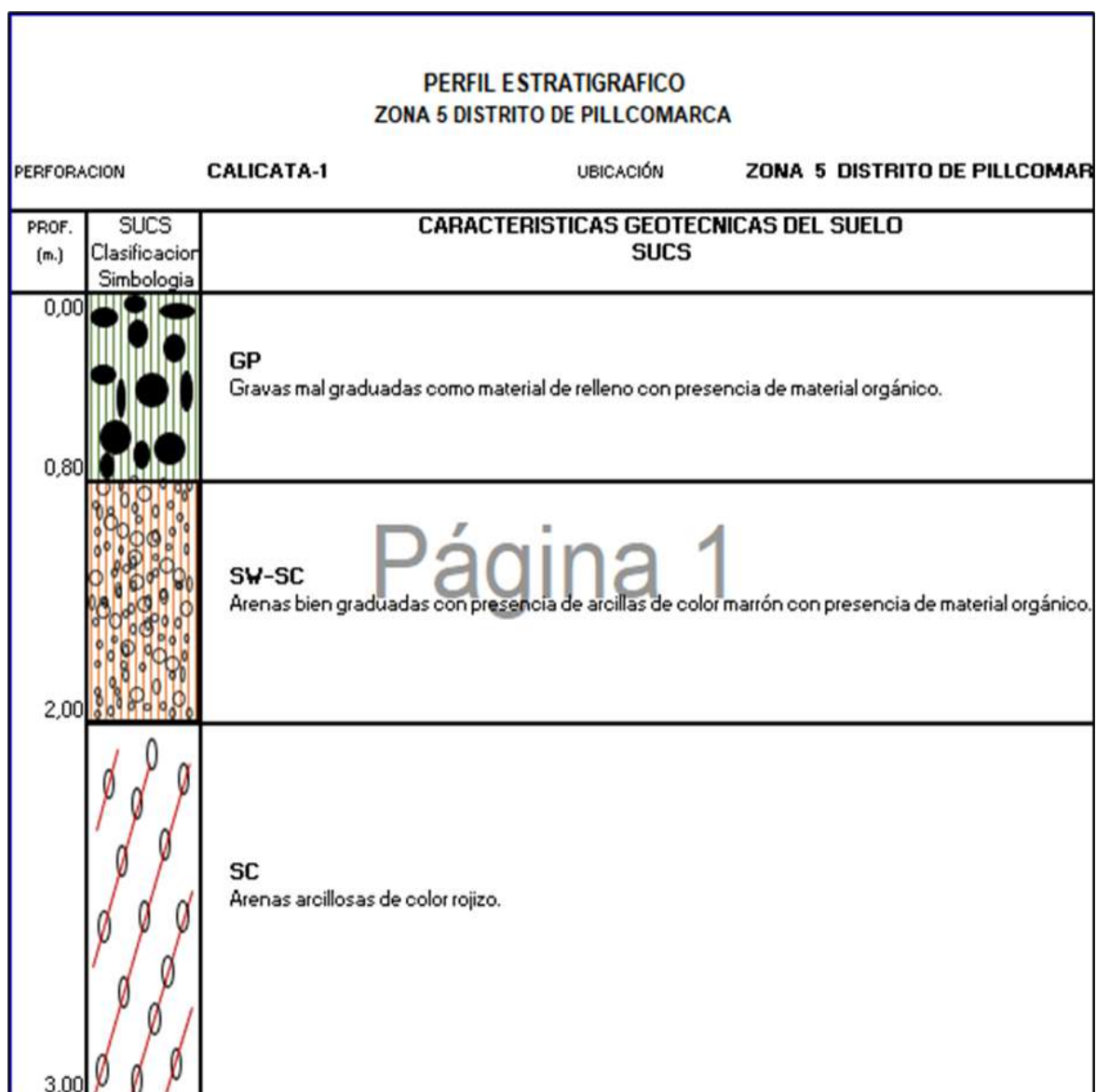


Figura 7.7 Perfil estratigráfico de la calicata (C-2)

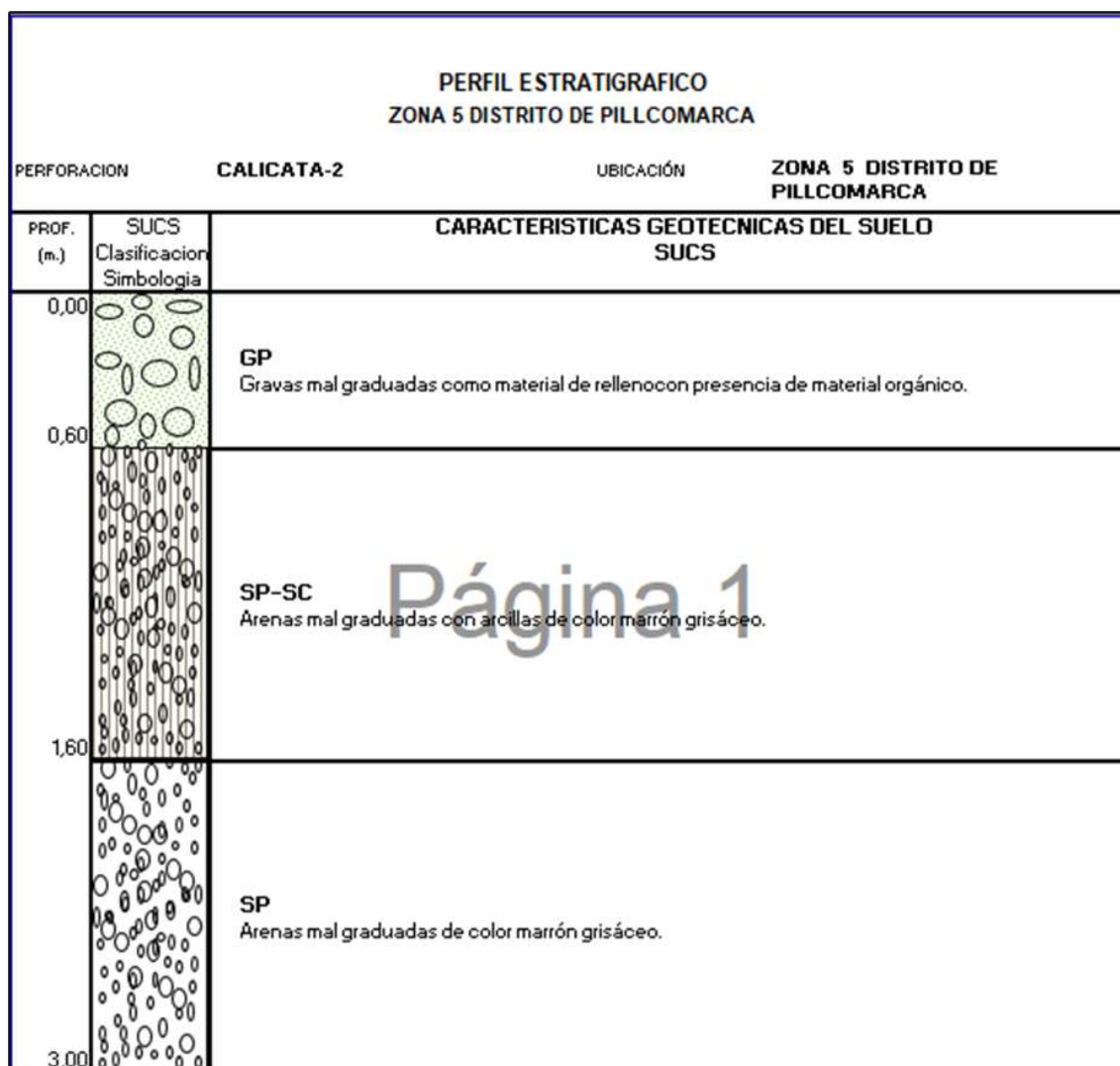
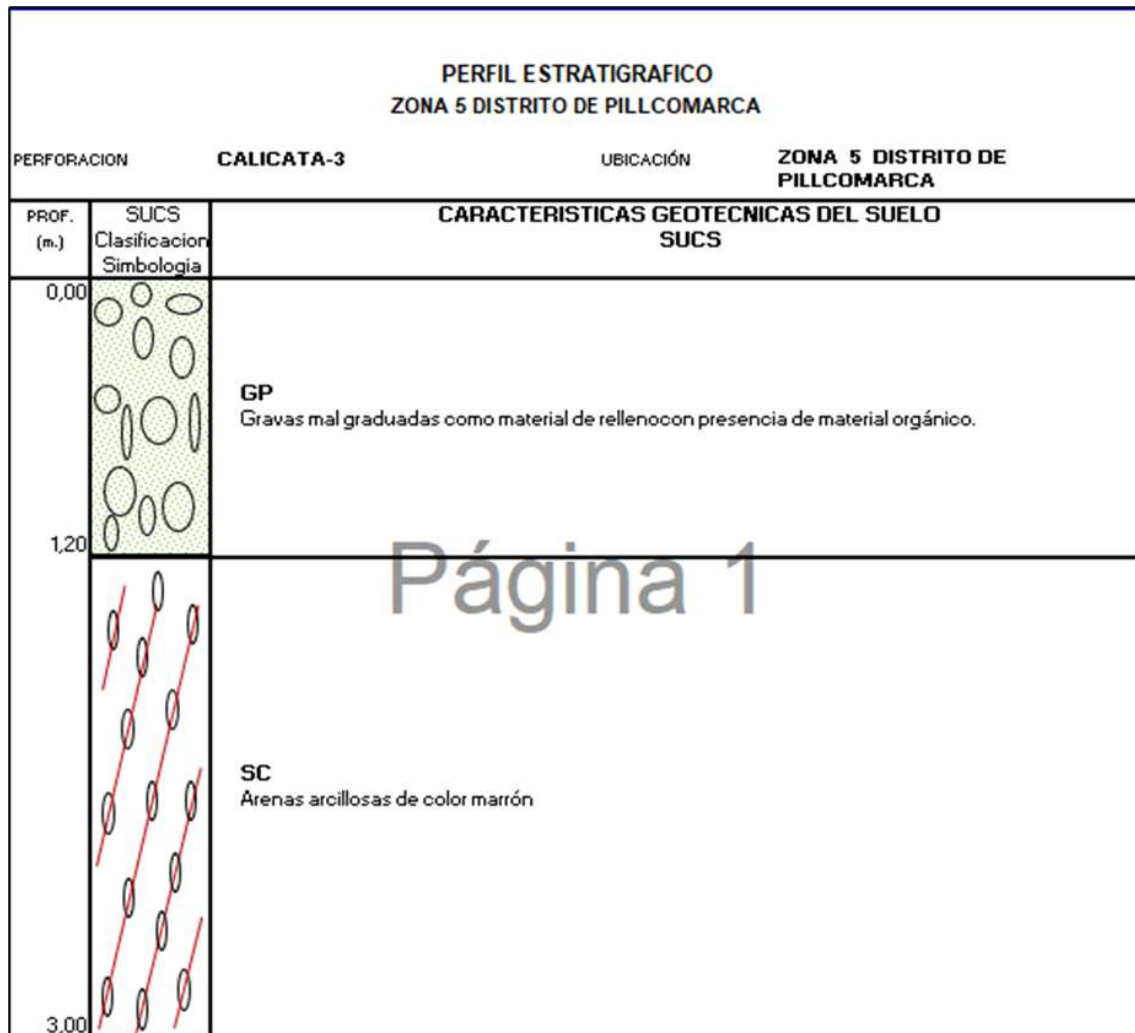


Figura 7.8 Perfil estratigráfico de la calicata (C-3)

Página 1

7.3 Mapas de capacidad de soporte (CBR)

La capacidad de soporte del suelo, expresada mediante el índice CBR (California Bearing Ratio), constituye un parámetro fundamental para el diseño de pavimentos y la evaluación de la aptitud del terreno para soportar cargas estructurales. Los mapas de CBR elaborados para cada zona integran los resultados de los ensayos realizados bajo diferentes energías de compactación (Bowles, 1997); (Das, 2001).

7.3.1 Zona 1 – Capacidad de Soporte Moderada

La Zona 1 presenta valores de CBR que varían significativamente según el nivel de compactación alcanzado (Tabla 7.8).

Tabla 7.8 Resultados CBR – Zona 1

Condición	CBR (%)	Calidad
Estado natural	10-20	Regular
95% Proctor Mod.	30-40	Buena
100% Proctor Mod.	40-50	Muy buena

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

El CBR al 100% de compactación alcanza valores de 40-50%, lo que clasifica a estos suelos como excelentes para subrasante según los criterios de la normativa vial (Ministerio de Transporte y Comunicaciones - MTC, 2016). La relación directa entre densidad seca y CBR confirma que la compactación es el factor más determinante para la capacidad de soporte de estos suelos granulares.

7.3.2 Zona 2 – Capacidad de Soporte Limitada

La Zona 2 presenta valores de CBR más limitados (11-14%), directamente dependientes de la energía de compactación (Tabla 7.9).

Tabla 7.9 Resultados CBR – Zona 2 (Estrato 2)

Golpes/capa	Densidad seca (kg/m ³)	CBR (%)
10	1,903.91	11.03
25	2,128.07	11.11
56	2,198.48	14.29

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

La baja capacidad de soporte en estado natural limita el uso de estos suelos para aplicaciones que requieran altas cargas, aunque la compactación controlada mejora significativamente su desempeño. Se recomienda un CBR de diseño conservador del 11% (Bowles, 1997).

7.3.3 Zona 3 – Capacidad de Soporte Buena a Excelente

La Zona 3 presenta los mejores valores de CBR del área de estudio, con rangos entre 21% y 38% (Tabla 7.10).

Tabla 7.10 Resultados CBR – Zona 3

Calicata	SUCS	CBR (0.1")	CBR (0.2")	γ_d (g/cm ³)
C01-E02	SW-SC	23%	23%	2.105
C02-E02	SP	38%	37%	2.066
C03-E02	SW-SC	21%	19%	2.125

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

La Calicata C02-E02 presenta el mejor desempeño (CBR 38%), asociado a su condición de arena mal graduada (SP) que alcanza altas densidades secas. Los suelos SW-SC muestran valores intermedios (21-23%), consistentes con su mayor contenido de finos cohesivos. El mapa del Índice CBR para profundidades de 1.5 a 3.0 m muestra una variabilidad espacial moderada, con los valores más altos en el sector norte de la zona (Palacio-Pacheco et al., 2021).

7.3.4 Zona 4 – Capacidad de Soporte Moderada

La Zona 4 presenta una capacidad de soporte variable, con valores de CBR que van desde 19% hasta 35% (Tabla 7.11).

Tabla 7.11 Resultados CBR – Zona 4

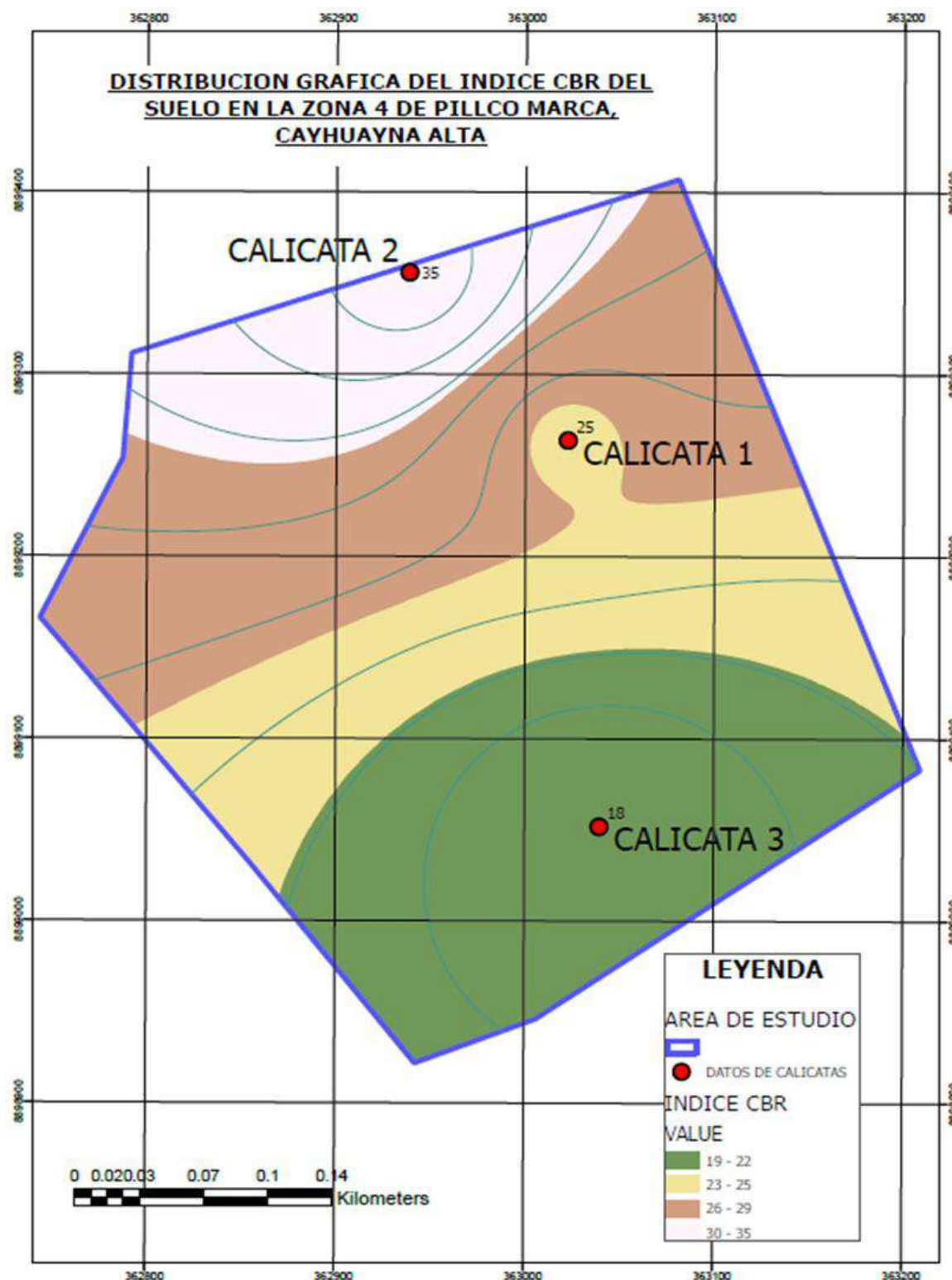
Calicata	CBR (%)	Densidad seca máx. (g/cm ³)	Humedad óptima (%)
C-11	23-25	2.018	7.9
C-12	30-35	2.104	7.5
C-13	19-22	2.086	7.4

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

El mapa de zonificación del índice CBR (Figura 7.9) muestra cuatro intervalos:

- 19-22 (verde): Localizado en la parte sur (Calicata 3), representando los valores más bajos.
- 23-25 (amarillo): Centro y noreste (Calicata 1), zona de transición.
- 26-29 (marrón claro): Franja alrededor de la Calicata 1, indicando aumento progresivo.
- 30-35 (marrón oscuro): Región noroeste (Calicata 2), valores más altos.

Figura 7.9 Mapa de zonificación índice de CBR



7.3.5 Zona 5 – Capacidad de Soporte Muy Baja

La Zona 5 presenta las condiciones de capacidad de soporte más críticas del área de estudio (Tabla 7.12).

Tabla 7.12 Resultados CBR – Zona 5

Condición de compactación	CBR (%)
95% Proctor Modificado	0.86
100% Proctor Modificado	2.10

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

El CBR inferior al 3% incluso al 100% de compactación indica que este suelo no es apto para soportar cargas estructurales significativas sin un tratamiento previo de mejoramiento o estabilización. Esta condición es típica de suelos arcillo-arenosos con alta sensibilidad al contenido de humedad (Bowles, 1997); (Terzaghi et al., 1996).

7.4 Mapas de resistencia al corte y compresibilidad

Los mapas de resistencia al corte y compresibilidad constituyen herramientas fundamentales para el análisis de estabilidad de taludes y la estimación de asentamientos en proyectos de cimentación (Craig & Knappett, 2012); (Terzaghi et al., 1996).

7.4.1 Mapa de Ángulo de Fricción Interna

El ángulo de fricción interna (φ') es el parámetro que gobierna la resistencia al corte en suelos granulares. Los mapas elaborados para cada zona muestran una variabilidad significativa (Tabla 7.13).

Tabla 7.13 Ángulos de fricción interna por zona

Zona	SUCS	φ' (°)	Rango de variación	Observaciones
I	SP-ML	34.8	30-36	Alta resistencia friccional
II	SP	29.9	28-32	Resistencia moderada
III	SW, SP, SM	22.5-24.8	22-26	Influencia de finos
IV	SC-SM, GC-GM	24.7-30.4	24-31	Variabilidad espacial
V	SC, SW-SC	20.3	18-22	Baja resistencia

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Interpretación zonal:

Zona I: El alto ángulo de fricción (34.8°) refleja un comportamiento friccional puro, con cohesión despreciable (5.57 kN/m^2). Esto permite clasificar al suelo como granular de compacidad media a densa, una vez compactado (Terzaghi et al., 1996).

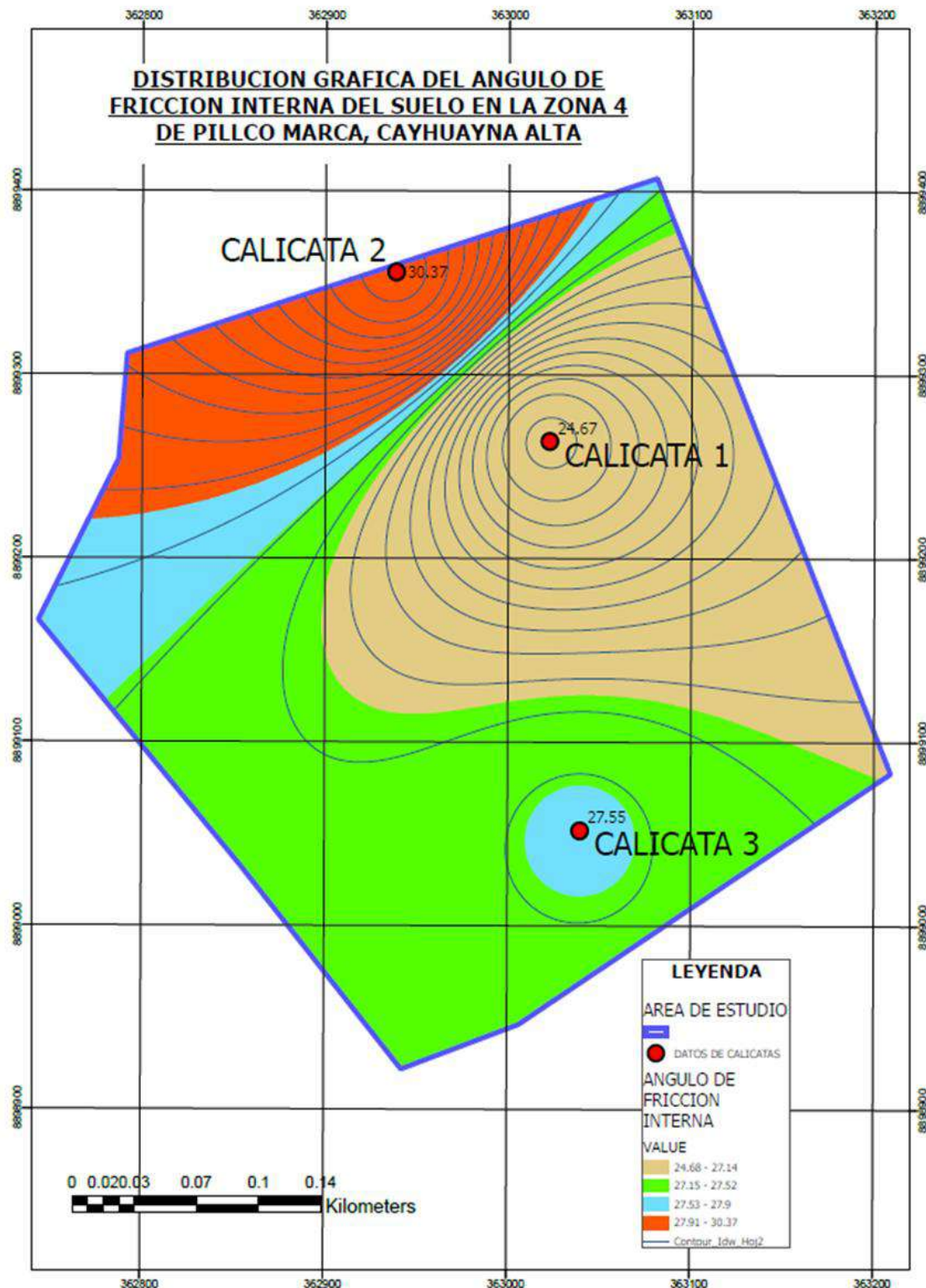
Zona II: El ángulo de fricción de 29.9° es consistente con suelos granulares con influencia de finos, donde la cohesión (15.51 kN/m^2) no es despreciable para diseño conservador (Craig & Knappett, 2012).

Zona III: Los ángulos de fricción moderados ($22.5\text{-}24.8^\circ$) reflejan la influencia de los finos cohesivos, con una relación lineal entre esfuerzos ($\tau/\sigma = 0.443$) que valida el criterio de Coulomb-Mohr.

Zona IV: La variabilidad del ángulo de fricción ($24.7\text{-}30.4^\circ$) se correlaciona con el contenido de finos, con la Calicata 2 presentando el mayor valor (30.37°) y la Calicata 1 el menor (24.67°) (Figura 7.10).

Zona V: El bajo ángulo de fricción (20.3°) refleja la reducción del componente friccional por la presencia de partículas arcillosas, con un comportamiento mixto fricción-cohesión.

Figura 7.10 Mapa de zonificación de ángulo de fricción interna



7.4.2 Mapa de Cohesión

La cohesión (c') refleja la resistencia interna del suelo por fuerzas de atracción entre partículas. Los mapas de zonificación muestran valores que varían desde muy bajos (suelos granulares puros) hasta moderados (suelos con contenido arcilloso) (Tabla 7.14).

Tabla 7.14 Cohesión por zona

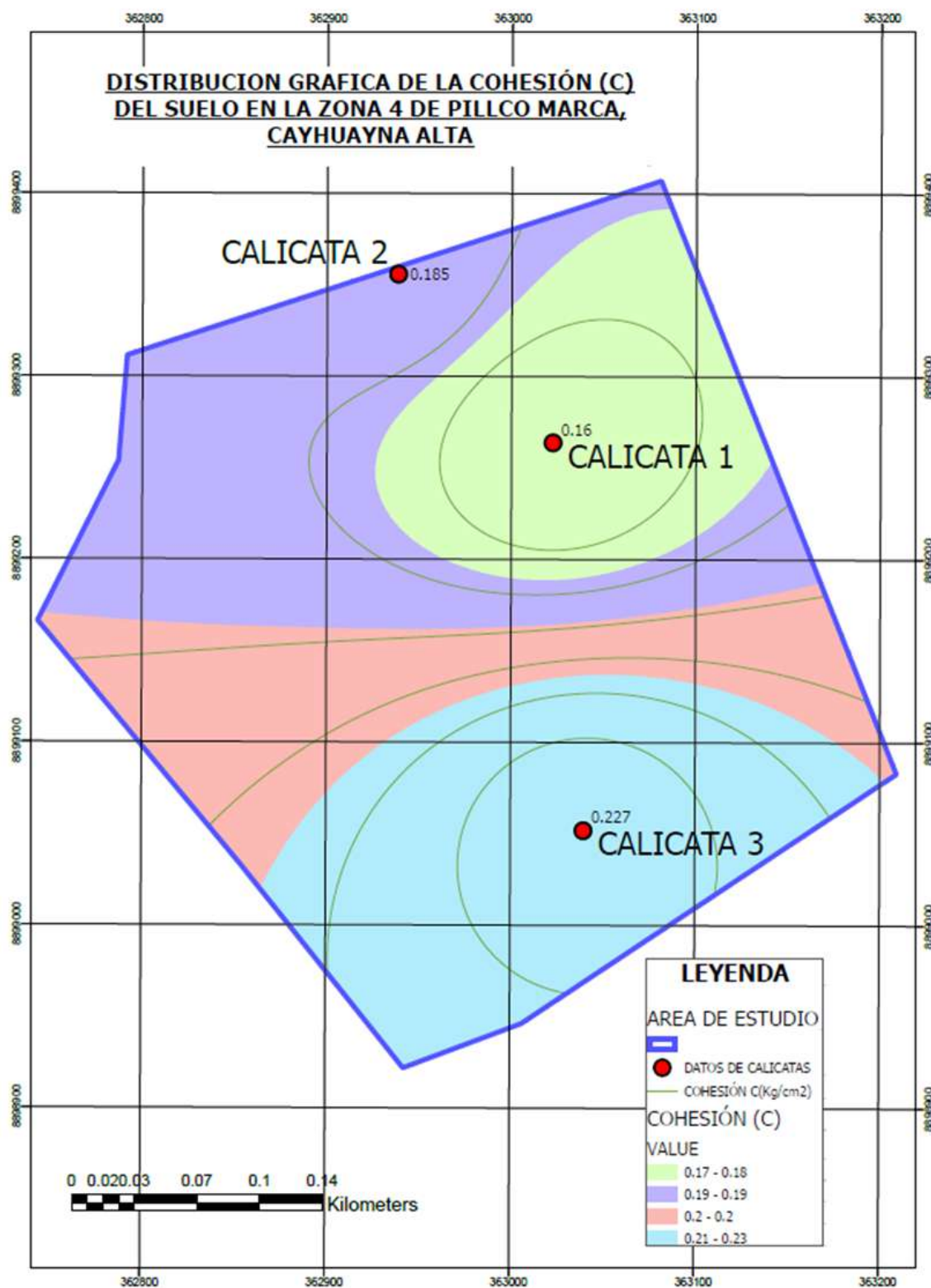
Zona	SUCS	c' (kN/m ²)	c' (kg/cm ²)	Características
I	SP-ML	5.57	0.057	Muy baja, despreciable
II	SP	15.51	0.158	Baja, influencia de finos
III	SW, SP, SM	0.88 (CD) / 0.69 (Triaxial)	0.009 / 0.007	Prácticamente nula
IV	SC-SM, GC-GM	15.7-22.3	0.16-0.227	Moderada, asociada a finos
V	SC, SW-SC	53.3	0.544	Moderada, influencia arcillosa

Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Interpretación del mapa de cohesión (Zona 4 - Figura 7.11):

- Intervalo 0.17-0.18 kg/cm² (verde claro): Domina el área central, alrededor de la Calicata 2 (0.185 kg/cm²), indicando cohesión moderada.
- 0.16 kg/cm² (Calicata 1): Cohesión relativamente baja en el centro-norte, rodeada por zonas con cohesiones mayores.
- 0.19-0.20 kg/cm² (rosado): Aumento gradual hacia el sur, zona intermedia.
- 0.21-0.23 kg/cm² (azul): Parte más al sur (Calicata 3 con 0.227 kg/cm²), representando la mayor cohesión.

Figura 7.11 Mapa de zonificación del coeficiente de cohesión



7.4.3 Mapa de Compresibilidad

El índice de compresibilidad (C_c) cuantifica la deformación volumétrica del suelo bajo carga, siendo fundamental para la estimación de asentamientos (Tabla 7.15).

Tabla 7.15 Índices de compresibilidad por zona

Zona	SUCS	C_c	σ'_p (kg/cm ²)	Nivel de compresibilidad
I	SP-ML	0.091	3.0	Baja
II	SP	0.091	3.0	Baja
III	SW, SM	0.07	4.0	Muy baja
IV	SC-SM	0.16-0.332	2.1-3.5	Baja a alta (variable)
V	SC	0.091	—	Baja a moderada

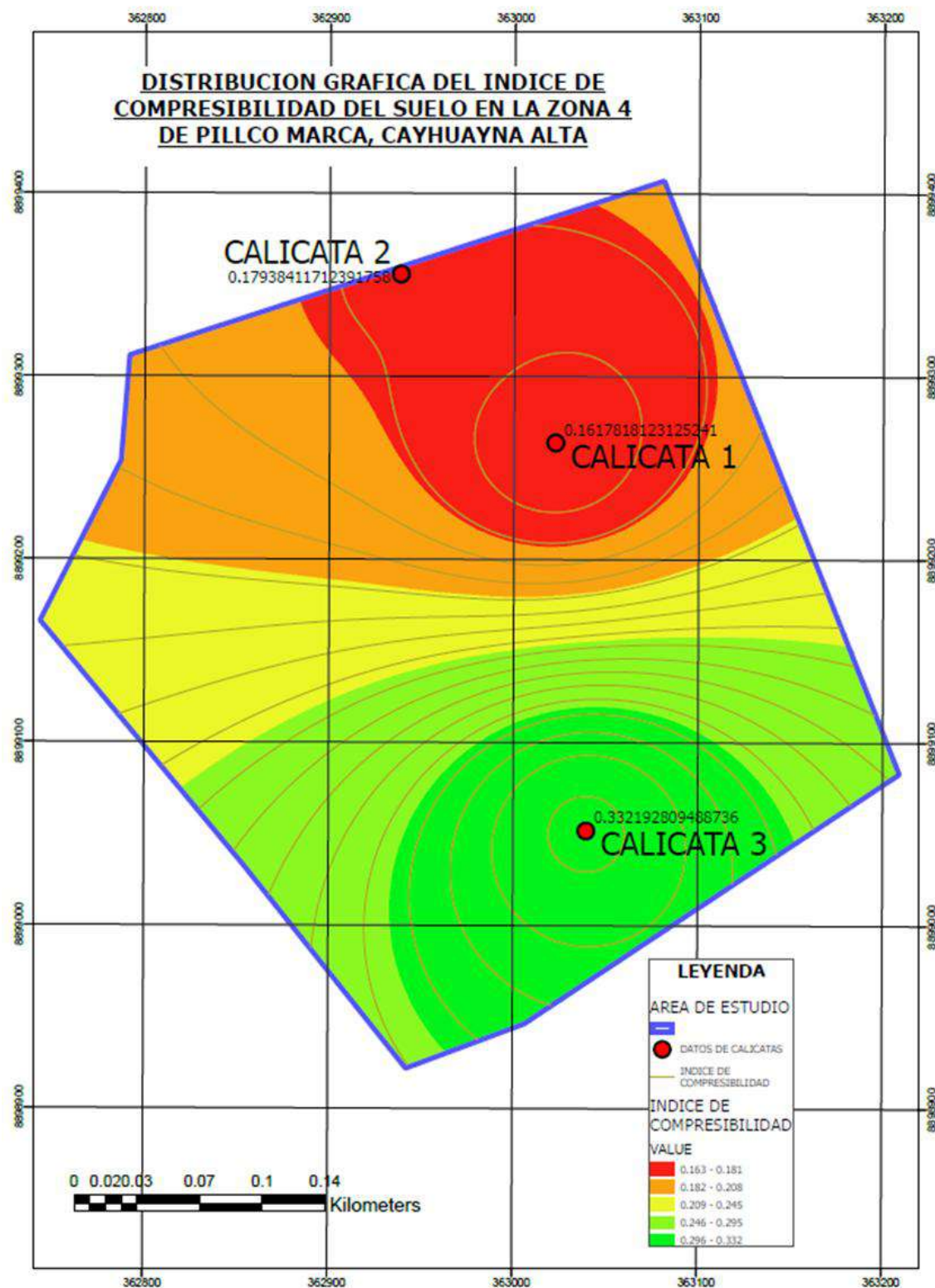
Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Interpretación del mapa de compresibilidad (Zona 4 - Figura 7.12):

- 0.163-0.181 (rojo): Proximidades de la Calicata 1 (0.1617), baja compresibilidad.
- 0.182-0.208 (naranja): Transición entre Calicatas 1 y 2 (Calicata 2 con 0.179), compresibilidad moderada.
- 0.209-0.245 (amarillo): Región entre Calicatas 2 y 3, suelos con mayor tendencia a la deformación.
- 0.246-0.332 (verde): Cercanía de la Calicata 3 (0.332), máxima compresibilidad del área.

Sectores con $C_c > 0.25$ son propensos a asentamientos diferenciales bajo cargas estructurales, requiriendo refuerzos específicos o la implementación de cimentaciones profundas (Terzaghi et al., 1996); (Das, 2001).

Figura 7.12 Mapa de zonificación del índice de compresibilidad



7.4.4 Mapa de Carga de Preconsolidación

La carga de preconsolidación (σ'_p) indica el máximo esfuerzo efectivo al que ha estado sometido el suelo en el pasado, condicionando su comportamiento deformacional futuro (Tabla 7.16).

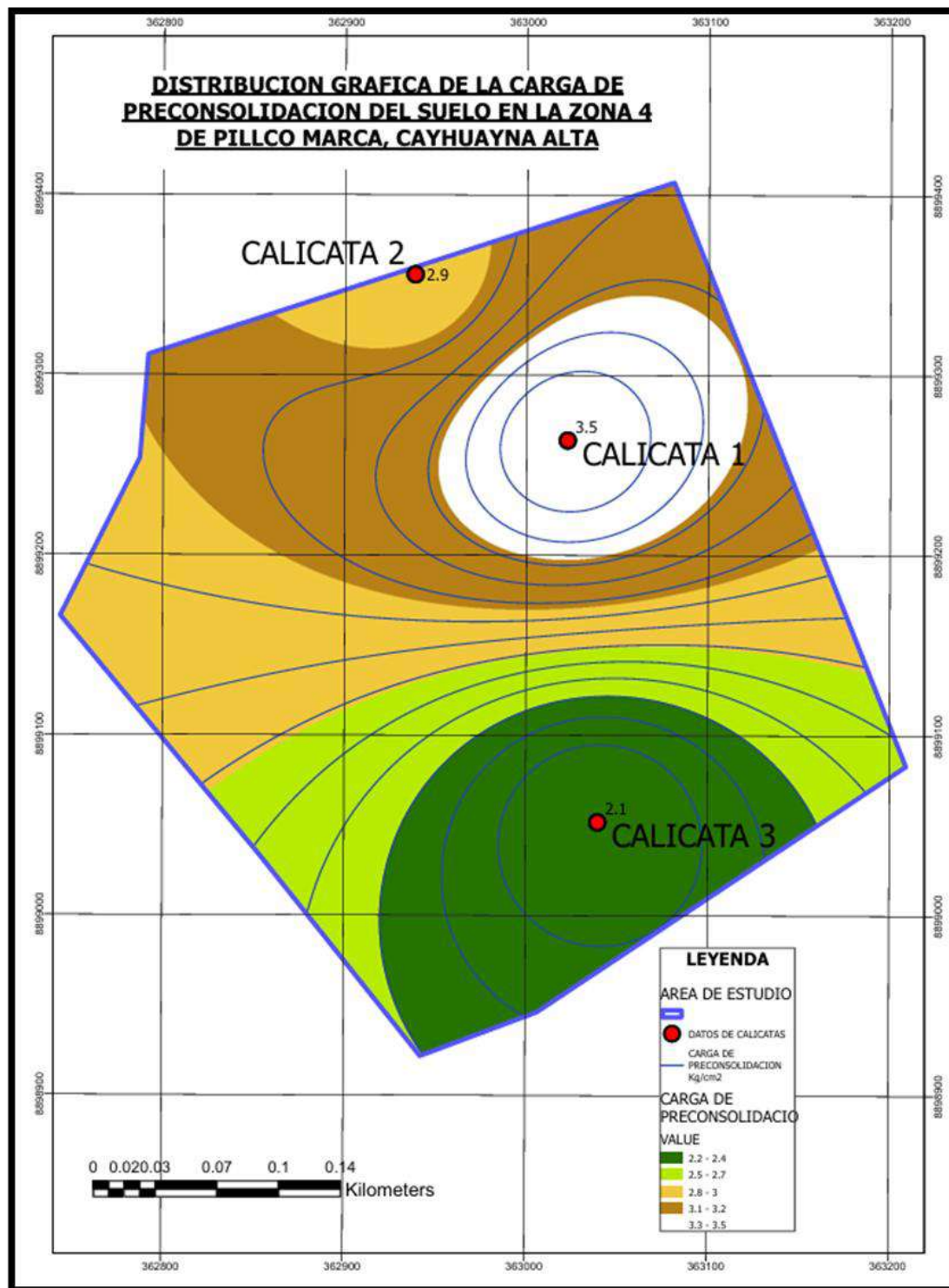
Tabla 7.16 Carga de preconsolidación por zona

Zona	SUCS	σ'_p (kg/cm ²)	σ'_p (kN/m ²)	Estado de consolidación
I	SP-ML	3.0	300	Ligeramente preconsolidado
II	SP	3.0	300	Ligeramente preconsolidado
III	SW, SM	4.0	400	Preconsolidado
IV	SC-SM	2.1-3.5	210-350	Variable
V	SC	—	—	Por determinar

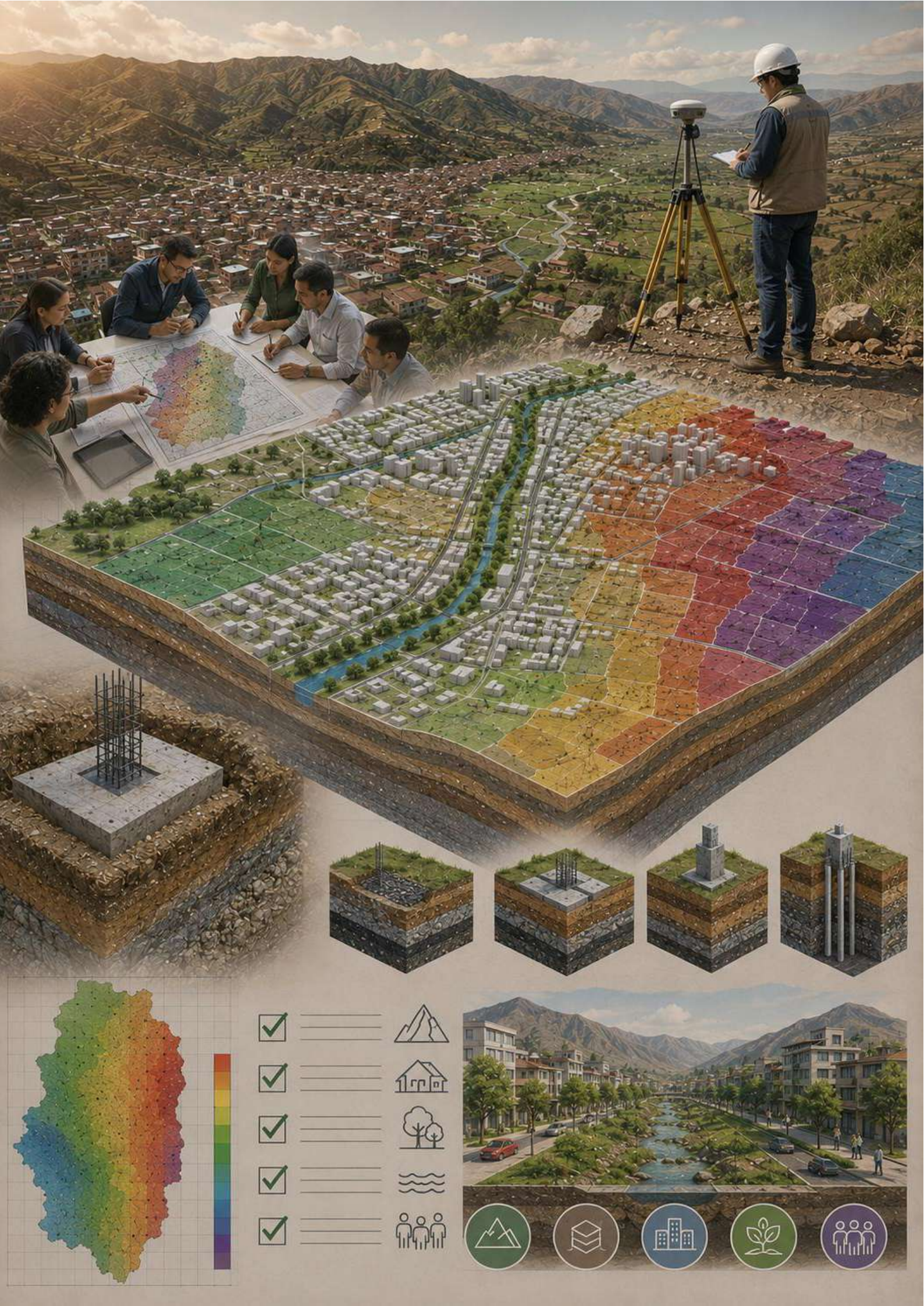
Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos de laboratorio

Interpretación del mapa de carga de preconsolidación (Zona 4 - Figura 7.13):

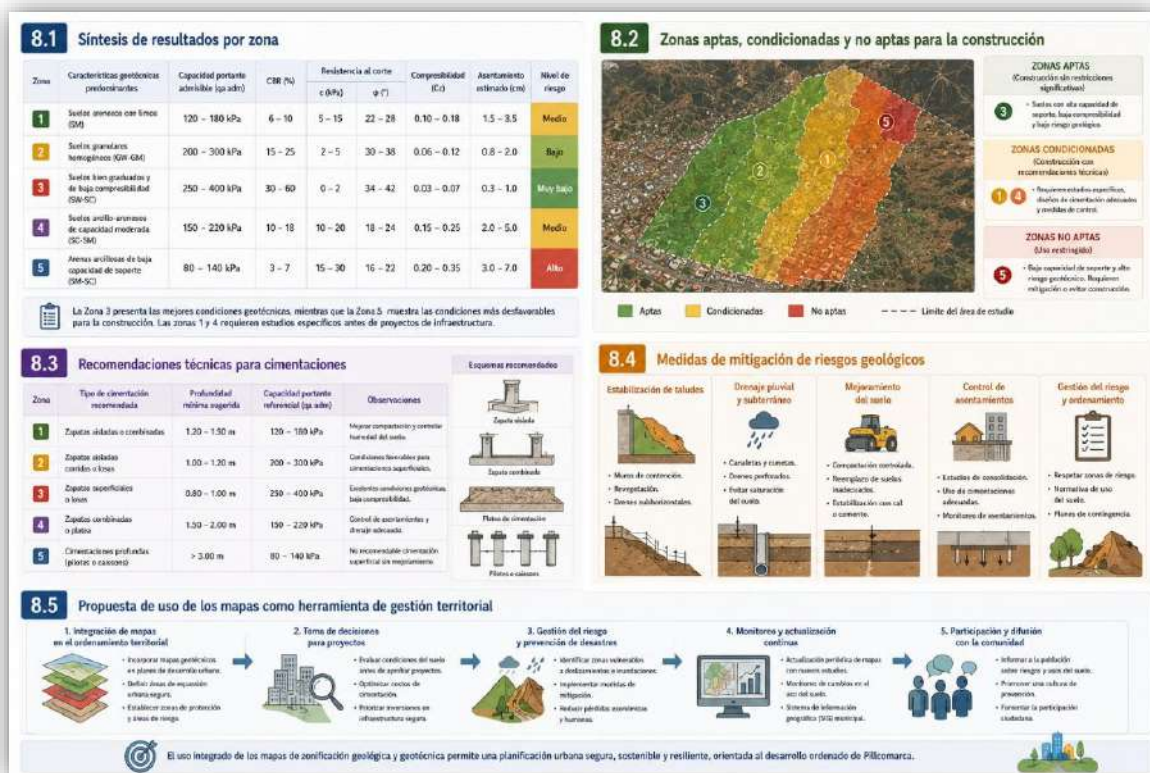
- 2.1-2.4 kg/cm² (verde oscuro): Extremo sur (Calicata 3), baja carga de preconsolidación, suelos menos compactados.
- 2.5-2.7 kg/cm² (verde claro): Transición entre Calicatas 2 y 3.
- 2.8-3.0 kg/cm² (amarillo claro): Noroeste (Calicata 2), consolidación moderada.
- 3.1-3.2 kg/cm² (marrón claro): Zona intermedia entre Calicatas 1 y 2.
- 3.3-3.5 kg/cm² (marrón oscuro): Noreste (Calicata 1), mayor carga de preconsolidación, suelo significativamente más consolidado.

Figura 7.13 Mapa de zonificación de la carga de preconsolidación

La alta presión de preconsolidación en la Zona III (400 kPa) indica que el suelo ha soportado esfuerzos superiores a las cargas de servicio esperadas, por lo que los asentamientos adicionales serán reducidos (Terzaghi et al., 1996).



CAPÍTULO 8. Conclusiones y recomendaciones para la planificación urbana



8.1 Síntesis de resultados por zona

La investigación desarrollada permitió caracterizar integralmente las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del distrito de Pillcomarca, estableciendo una zonificación confiable del terreno mediante trabajos de campo, ensayos de laboratorio y análisis geodésico-fotogramétrico. A continuación, se presenta una síntesis de los resultados obtenidos por cada zona de estudio.

8.1.1 Zona 1 – Área Urbana Central

La Zona 1 presenta una geología compleja, caracterizada por la coexistencia de rocas metamórficas del Complejo Maraño, rocas intrusivas del Batolito de Higuera–Marabamba y depósitos cuaternarios recientes (Quispesivana Quispe, 1996). Las rocas intrusivas constituyen los sectores más estables debido a su alta capacidad portante ($>10 \text{ kg/cm}^2$), mientras que los depósitos aluviales y coluviales representan áreas con mayor susceptibilidad a procesos geodinámicos como deslizamientos, inundaciones y huaycos, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas y cercanas a riberas.

Desde el punto de vista geotécnico, el suelo predominante corresponde a una arena mal graduada con presencia de limos, clasificada como SP-ML/SP-MH según SUCS y A-2-4/A-2-5 según AASHTO. Estos suelos presentan retención de agua y cambios volumétricos moderados. Los parámetros de resistencia al corte determinados, con una cohesión de 5.57 kN/m^2 y un ángulo de fricción efectiva de 34.8° , son característicos de suelos arenosos con comportamiento friccional dominante.

El ensayo de consolidación unidimensional evidenció una consolidación primaria rápida bajo cargas crecientes, con deformaciones que aumentan conforme se incrementa la carga aplicada y una influencia mínima de consolidación secundaria. Los valores del ensayo CBR se encuentran dentro de los rangos esperados para este tipo de suelo (10-20% en estado natural y 30-50% al 100% Proctor Modificado), confirmando su comportamiento acorde con la clasificación geotécnica obtenida (Das, 2001).

8.1.2 Zona 2 – Área de Transición

Los suelos analizados mediante calicatas centrales y secundarias fueron clasificados, según AASHTO, como A-2-4 y A-2-6 (gravas y arenas limosas o

arcillosas), y según SUCS como arenas mal graduadas (SP). Esta clasificación indica una baja proporción de finos, condición favorable para la ejecución de obras de ingeniería civil (Terzaghi, 1995).

Los ensayos Proctor permitieron determinar contenidos óptimos de humedad entre 11.14% y 13.52%, así como densidades secas máximas superiores a 2.05 g/cm^3 , evidenciando una buena respuesta del suelo frente a la compactación. Los resultados del ensayo CBR muestran valores variables según la energía de compactación aplicada, destacando un incremento significativo de la capacidad de soporte con el aumento del número de golpes, confirmando la influencia directa de la compactación en el desempeño estructural del suelo.

Los parámetros de resistencia al corte obtenidos indican un ángulo de fricción de 29.9° y una cohesión de 0.15 kg/cm^2 para el estrato principal, reflejando una resistencia a la corte moderada a buena, compatible con suelos granulares con bajo contenido de finos. El coeficiente de consolidación (C_v) presentó valores entre 29.76 y $45.40 \text{ cm}^2/\text{min}$, indicando una disipación relativamente rápida de presiones intersticiales.

8.1.3 Zona 3 – Área de Ladera

El análisis integral de la Zona 3 permitió identificar una heterogeneidad geotécnica significativa, con presencia de suelos clasificados como SW, SP, SM y SW-SC según el sistema SUCS. Los suelos bien graduados (SW) presentan alta estabilidad y buena capacidad de soporte, mientras que los suelos con mayor contenido de finos muestran mayor sensibilidad a la humedad.

El ensayo de consolidación unidimensional evidenció una presión de preconsolidación elevada ($\approx 400 \text{ kPa}$) y bajos índices de compresión ($C_c \approx 0.07$), recompresión ($C_r \approx 0.027$) y expansión ($C_s \approx 7.60 \times 10^{-5}$), lo que indica una baja compresibilidad y asentamientos reducidos frente a nuevas cargas

verticales. La alta presión de preconsolidación indica que el suelo ya ha soportado esfuerzos mayores a los de servicio, lo que resulta favorable para el diseño de cimentaciones (Terzaghi et al., 1996).

Los ensayos de corte directo y triaxial mostraron valores bajos de cohesión (0.07-0.09 kg/cm²) y ángulos de fricción interna moderados (22.49°-24.75°), confirmando que la resistencia al corte del suelo depende principalmente del comportamiento friccional. La relación lineal entre esfuerzos ($\tau = 0.443\sigma + 0.068$) valida el criterio de Coulomb-Mohr y permite un modelamiento confiable del comportamiento mecánico del suelo.

Los ensayos CBR indicaron que la máxima densidad seca y los mayores valores de capacidad de soporte se alcanzan con una energía de compactación equivalente a 56 golpes (CBR entre 21.05% y 37.90%), lo que evidencia la importancia del control de compactación en esta zona (Bowles, 1992).

8.1.4 Zona 4 – Cayhuayna Alta

La Zona 4 presenta suelos clasificados como SC-SM según SUCS y A-1-b según AASHTO, caracterizados por una mezcla equilibrada de partículas gruesas y finas con plasticidad baja a moderada. Estas características fueron determinadas mediante ensayos granulométricos y límites de Atterberg (LL: 20.07-25.04%, IP: 3.41-3.46%).

Los ensayos mecánicos evidenciaron una capacidad de carga moderada, con un índice CBR del 25% y una energía de compactación correspondiente al Proctor modificado de aproximadamente 2700 kJ/m³, lo que resulta relevante para el diseño de cimentaciones superficiales. El ensayo de corte directo permitió determinar un ángulo de fricción de 24.67° y una cohesión de 0.16 kg/cm², indicando que la resistencia al corte del suelo está dominada principalmente por la fricción entre partículas.

El ensayo de consolidación unidimensional mostró un índice de compresibilidad de 0.16 y una carga de preconsolidación de 3.5 kg/cm^2 , lo que indica una deformación moderada bajo carga y una adecuada capacidad para soportar esfuerzos adicionales. Desde el punto de vista geológico, se identificaron dos unidades: rocas intrusivas del Cretáceo-Paleógeno, que brindan alta estabilidad estructural, y depósitos aluviales recientes, caracterizados por alta permeabilidad y mayor variabilidad geotécnica.

8.1.5 Zona 5 – Área Urbana Alta

Los suelos predominantes son arenas arcillosas con variaciones en el contenido de finos y en el índice de plasticidad. Dos sectores presentan condiciones aceptables para cargas dinámicas moderadas, mientras que el tercero, con mayor contenido de arcilla y bajo índice de plasticidad, muestra un comportamiento desfavorable frente a cargas dinámicas.

El ensayo de consolidación unidimensional evidenció un coeficiente de consolidación de $0.52 \text{ cm}^2/\text{s}$ y un índice de compresibilidad de 0.091, lo que indica una consolidación relativamente rápida y baja compresibilidad, coherente con suelos arenosos con bajo contenido de arcilla (Das, 2001). El ensayo Proctor modificado determinó una humedad óptima de 8.6% y una densidad seca máxima de 1.74 g/cm^3 , indicando que el suelo es apto para construcciones ligeras a medianas siempre que se controle estrictamente el contenido de humedad.

Los resultados del ensayo CBR muestran valores muy bajos (0.86% al 95% Proctor Modificado y 2.10% al 100%), confirmando una capacidad portante extremadamente baja, lo que limita su uso en estructuras que demanden altas cargas (Bowles, 1992). El ensayo de corte directo evidenció una cohesión moderada (0.5437 kg/cm^2) y un ángulo de fricción interna de 20.3° ,

reflejando un comportamiento mixto entre fricción granular y cohesión arcillosa.

8.2 Zonas aptas, condicionadas y no aptas para la construcción

Con base en los resultados obtenidos y los criterios establecidos en el Reglamento Nacional de Edificaciones (Norma E.050 "Suelos y Cimentaciones") (Municipalidad Distrital de Santa María del Mar, 2016) (Ministerio de Vivienda, 2021), se ha clasificado el territorio del distrito de Pillcomarca en tres categorías de aptitud constructiva.

8.2.1 Zonas Aptas para la Construcción

Zona 1 (Área Urbana Central):

- Clasificación: Zona con condiciones favorables para el desarrollo urbano
- Características geotécnicas: Suelos granulares SP-ML con alta resistencia por fricción ($\phi' = 34.8^\circ$), baja compresibilidad ($C_c \approx 0.05-0.15$) y buena capacidad de soporte (CBR 10-20% en estado natural; 30-50% al 100% Proctor Modificado)
- Capacidad portante admisible: 193-217 kPa para zapatas aisladas y corridas
- Aptitud: Alta, para edificaciones de hasta 4 niveles con cimentaciones superficiales
- Recomendaciones: Adecuado control de compactación y humedad durante la ejecución de obras

Zona 3 (Área de Ladera):

- Clasificación: Zona con condiciones mayormente favorables, con excepción de sectores con pendientes críticas
- Características geotécnicas: Suelos SW, SP, SM y SW-SC con baja compresibilidad ($C_c=0.07$) y alta presión de preconsolidación (≈ 400 kPa)
- Capacidad portante: Moderada a buena, con CBR entre 21.05% y 37.90% al 100% Proctor Modificado
- Aptitud: Media-Alta, para edificaciones de hasta 3 niveles con cimentaciones superficiales en áreas de pendiente suave
- Recomendaciones: Evaluación detallada de pendientes y estabilidad de taludes antes de la construcción

8.2.2 Zonas Condicionadas para la Construcción**Zona 2 (Área de Transición):**

- Clasificación: Zona con condiciones intermedias que requieren medidas técnicas especiales
- Características geotécnicas: Suelos SP (arenas mal graduadas) con contenido de finos plásticos (LL: 55.90-57.35%) y resistencia moderada ($\varphi=29.9^\circ$, $c=0.15$ kg/cm²)
- Capacidad portante: Limitada, CBR $\approx 11\%$ en condiciones óptimas de compactación
- Aptitud: Media, para edificaciones ligeras y viviendas de hasta 2 niveles
- Condicionantes: Control estricto de compactación ($\geq 95\%$ Proctor Modificado), manejo adecuado de humedad, implementación de sistemas de drenaje

- Riesgos: Sensibilidad a variaciones de humedad, asentamientos diferenciales potenciales

Zona 4 (Cayhuayna Alta):

- Clasificación: Zona con condiciones geotécnicas heterogéneas y variabilidad espacial significativa
- Características geotécnicas: Suelos SC-SM (arena arcillosa-limosa) con plasticidad baja a moderada (IP: 3.41-3.46%), capacidad portante moderada (CBR $\approx$ 25%)
- Capacidad portante: Moderada, con CBR entre 19% y 35% según sector
- Aptitud: Media, para edificaciones de hasta 3 niveles con cimentaciones superficiales adecuadamente diseñadas
- Condicionantes: Verificación puntual de asentamientos, control de compactación, evaluación de compresibilidad variable (Cc: 0.1617-0.332)
- Riesgos: Asentamientos diferenciales en sectores con alta compresibilidad (Cc > 0.25)

8.2.3 Zonas No Aptas para la Construcción

Zona 5 (Área Urbana Alta):

- Clasificación: Zona con condiciones desfavorables que restringen el desarrollo constructivo
- Características geotécnicas: Arenas arcillosas con baja capacidad portante (CBR: 0.86-2.10%), bajo ángulo de fricción ($\varphi=20.3^\circ$), cohesión moderada ($c=0.54 \text{ kg/cm}^2$)
- Capacidad portante: Extremadamente baja, insuficiente para cargas medias y altas

- Aptitud: Baja, restringida a estructuras muy ligeras y temporales
- Limitantes: $\text{CBR} < 3\%$ en estrato crítico, baja fricción interna, sensibilidad al contenido de humedad
- Riesgos: Asentamientos acumulativos, inestabilidad frente a cargas estructurales, procesos de lavado de finos por infiltración de agua
- Recomendaciones: Evitar construcciones de importancia, implementar mejoramiento de suelos, sistemas de drenaje obligatorios, considerar cimentaciones profundas para cargas significativas

8.2.4 Sectores Críticos por Procesos Geodinámicos

Adicionalmente a la clasificación por propiedades geotécnicas, se identifican sectores críticos por procesos geodinámicos activos:

- Áreas de inundación: Zonas próximas a los ríos Huallaga, Higuera y Huancachupa, susceptibles a desbordes durante épocas de lluvias intensas
- Zonas de erosión de riberas: Márgenes de ríos en tramos sinuosos con materiales poco consolidados
- Laderas propensas a deslizamientos: Sectores con pendientes pronunciadas ($>25\text{-}35\%$), suelos cohesivos y rocas fracturadas
- Áreas de huaycos: Quebradas del sector noroeste con pendientes entre 30° y 40° .

8.3 Recomendaciones técnicas para cimentaciones

8.3.1 Cimentaciones Superficiales

Las cimentaciones superficiales son viables en las Zonas 1, 3 y sectores favorables de las Zonas 2 y 4, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

Para Zonas Aptas (Zona 1 y 3):

- Zapatas aisladas: Profundidad de desplante ≥ 0.80 m, ancho mínimo de 0.60 m
- Zapatas corridas: Profundidad de desplante ≥ 0.80 m, ancho mínimo de 0.40 m
- Losas de cimentación: Para edificaciones de 3-4 niveles en suelos de capacidad portante ≥ 200 kPa
- Capacidad portante admisible: 193-217 kPa para zapatas aisladas y corridas
- Factor de seguridad: ≥ 3.0

Para Zonas Condicionadas (Zona 2 y 4):

- Zapatas aisladas: Profundidad de desplante ≥ 1.00 m, dimensiones mayores
- Zapatas corridas: Profundidad de desplante ≥ 1.00 m
- Losas de cimentación: Recomendadas para distribuir cargas en suelos con capacidad portante limitada
- Mejoramiento del suelo: Considerar reemplazo de material o estabilización con cemento/cal si las cargas son elevadas

- Capacidad portante admisible: ≤ 150 kPa para la Zona 2, ≤ 180 kPa para la Zona 4

Para Zonas No Aptas (Zona 5):

- Restricción: Evitar cimentaciones superficiales para estructuras permanentes
- Alternativas: Cimentaciones profundas (pilotes, micropilotes) o mejoramiento extensivo del suelo
- Estructuras ligeras: Solo para cargas muy bajas y con sistemas de drenaje obligatorios

8.3.2 Cimentaciones Profundas

Se recomienda evaluar el uso de cimentaciones profundas en los siguientes casos:

- Zona 5: Para cualquier estructura de importancia que requiera ejecutarse en esta área
- Zonas con pendientes pronunciadas: Donde la estabilidad de cimentaciones superficiales esté comprometida
- Áreas con alta compresibilidad: Sectores de la Zona 4 con $C_c > 0.25$
- Cargas estructurales elevadas: Edificaciones de más de 4 niveles en cualquier zona

Tipos recomendados:

- Pilotes de concreto armado: Para cargas elevadas y profundidades > 6 m
- Micropilotes: Para espacios reducidos y cargas moderadas

- Pilotes de acero (hincados): En suelos granulares con presencia de gravas

8.3.3 Consideraciones para el Diseño Estructural

Parámetros de diseño recomendados:

Zona 1:

- Capacidad portante admisible: 193-217 kPa
- Módulo de elasticidad (E): ≈ 30 MPa
- Asentamientos admisibles: 7-23 mm
- Factor de seguridad: 3.0

Zona 2:

- Capacidad portante admisible: ≤ 150 kPa
- Ángulo de fricción: 29.9°
- Cohesión: 0.15 kg/cm^2 (no confiable para diseño conservador)
- Asentamientos: Evaluar por consolidación

Zona 3:

- Capacidad portante admisible: Moderada a buena
- Cohesión: $0.07\text{-}0.09 \text{ kg/cm}^2$
- Ángulo de fricción: $22.5\text{-}24.8^\circ$
- Compresibilidad: Baja ($C_c \approx 0.07$)

Zona 4:

- Capacidad portante admisible: Moderada ($\text{CBR} \approx 25\%$)
- Cohesión: $0.16\text{-}0.227 \text{ kg/cm}^2$
- Ángulo de fricción: $24.7\text{-}30.4^\circ$
- Índice de compresibilidad: $0.16\text{-}0.332$

Zona 5:

- Capacidad portante admisible: Muy baja ($\text{CBR} < 3\%$)
- Cohesión: 0.54 kg/cm^2
- Ángulo de fricción: 20.3°
- Evitar cargas significativas

8.3.4 Especificaciones de Compactación

Compactación de rellenos:

- Energía: Proctor Modificado (56 golpes/capa, 5 capas)
- Densidad: $\geq 95\%$ de la densidad seca máxima
- Humedad: Óptima $\pm 2\%$ (w_{opt} específico por zona)
- Control: Ensayos de campo (Densidad de Campo y Cono de Arena)

Compactación de subrasantes:

- Zonas 1 y 3: $\geq 95\%$ Proctor Modificado
- Zonas 2 y 4: $\geq 95\%$ Proctor Modificado con control riguroso
- Zona 5: $\geq 98\%$ Proctor Modificado (si se utiliza, evaluar viabilidad)

Especificaciones por zona:

Zona	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (g/cm³)	Observaciones
Zona 1	4.5	2.28	Suelo granular, fácil compactación
Zona 2	11.14	2.075	Mayor control de humedad requerido
Zona 3	10.82-8.14-9.99	2.10-2.26-2.11	Variable según estrato
Zona 4	7.4-7.9	2.018-2.104	Control estricto de humedad
Zona 5	8.6	1.74	Baja densidad, evaluar mejoramiento

8.4 Medidas de mitigación de riesgos geológicos**8.4.1 Riesgos por Inundación****Áreas de riesgo:**

- Zonas próximas a los ríos Huallaga, Higuera y Huancachupa
- Sectores cercanos a canales de riego
- Terrazas aluviales bajas

Medidas de mitigación:

- **Estructurales:**
 - Construcción de defensas ribereñas (muros de contención, gaviones)
 - Encauzamiento de quebradas y canales de drenaje
 - Sistemas de drenaje pluvial urbano
 - Pozos de infiltración para reducir escorrentía superficial

- **No estructurales:**
 - Restricción de construcciones en zonas de inundación
 - Sistema de alerta temprana ante crecidas
 - Plan de evacuación para zonas vulnerables
 - Reubicación de viviendas en áreas de alto riesgo
- **Recomendaciones específicas:**
 - Mantener franjas de protección de 30 m en riberas de ríos principales
 - Evitar la ocupación de terrazas aluviales bajas
 - Implementar sistemas de drenaje en zonas urbanas consolidadas

8.4.2 Riesgos por Deslizamientos y Movimientos en Masa

Áreas de riesgo:

- Laderas con pendientes pronunciadas ($>25\%$)
- Sectores con suelos cohesivos y rocas fracturadas
- Zonas con intervención antrópica (cortes de terreno)

Medidas de mitigación:

- **Estructurales:**
 - Muros de contención (gravedad, voladizo, anclados)
 - Terraplenes de contrapeso en base de taludes
 - Sistemas de drenaje subterráneo (drenes, subdrenes)
 - Gaviones y mallas de protección en taludes inestables
 - Anclajes pasivos y activos en rocas fracturadas
- **Geotécnicas:**
 - Mejoramiento de suelos (compactación, estabilización química)
 - Reforzamiento con geomallas y geotextiles

- Control de pendientes (terraceo, conformación de taludes)
- Revegetación de laderas para control de erosión
- **No estructurales:**
 - Regulación de cortes y rellenos en laderas
 - Prohibición de construcciones en zonas de alta pendiente ($>30\%$)
 - Monitoreo de desplazamientos en laderas críticas
 - Planificación urbana basada en zonificación de riesgos
- **Recomendaciones específicas:**
 - Pendiente máxima de construcción: 25% (14°)
 - Taludes de corte: $< 1H:1V$ en suelos cohesivos
 - Taludes de relleno: $< 1.5H:1V$ con compactación controlada
 - Instalación de piezómetros para monitoreo de nivel freático

8.4.3 Riesgos por Erosión de Riberas

Áreas de riesgo:

- Márgenes de ríos en tramos sinuosos
- Zonas con materiales poco consolidados
- Sectores con alta velocidad de corriente

Medidas de mitigación:

- **Estructurales:**
 - Espigones para desviar corriente y reducir velocidad
 - Enrocado de protección (rip-rap) en márgenes erosionables
 - Gaviones y muros de contención en riberas críticas
 - Revegetación de riberas con especies de raíz profunda

- **No estructurales:**

- Restricción de actividades extractivas en riberas
- Control de deforestación en cuencas aportantes
- Monitoreo de la evolución de riberas

8.4.4 Riesgos por Huaycos

Áreas de riesgo:

- Quebradas del sector noroeste (Pillcomarca)
- Sectores con pendientes 30°-40°
- Áreas con suelos aluviales y coluviales sin cobertura vegetal

Medidas de mitigación:

- **Estructurales:**

- Construcción de presas de retención de detritos (diques de contención)
- Canales de desviación y aliviaderos en quebradas
- Muros de contención en conos de deyección
- Reforestación de cuencas de quebradas para reducir escorrentía

- **No estructurales:**

- Restricción de construcciones en conos de deyección
- Sistema de alerta temprana ante fenómenos hidrometeorológicos extremos
- Plan de contingencia y evacuación

8.4.5 Riesgos por Licuación de Suelos

Áreas de riesgo:

- Depósitos aluviales recientes con arenas limosas saturadas
- Zonas con nivel freático elevado
- Sectores con baja densidad relativa

Medidas de mitigación:

- **Geotécnicas:**
 - Mejoramiento de suelos (compactación dinámica, vibroflotación)
 - Instalación de drenes verticales para disipar presiones de poros
 - Sustitución de materiales licuables
 - Diseño de cimentaciones profundas que eviten capas licuables
- **Estructurales:**
 - Diseño sísmico considerando potencial de licuación
 - Cimentaciones profundas ancladas en estratos competentes
 - Sistemas de drenaje para reducir nivel freático

8.5 Propuesta de uso de los mapas como herramienta de gestión territorial

8.5.1 Instrumentos Técnicos de Gestión Territorial

Los mapas de zonificación geológica y geotécnica elaborados en la presente investigación constituyen instrumentos técnicos fundamentales para la planificación urbana y la gestión del territorio en el distrito de Pillcomarca. Se propone su uso integrado en los siguientes procesos:

1. Planificación Urbana y Ordenamiento Territorial:

- Incorporación en el Plan de Desarrollo Urbano: Utilizar los mapas como base para la clasificación de áreas de expansión urbana, identificación de zonas de protección y definición de usos de suelo compatibles con las condiciones geotécnicas
- Zonificación de riesgos: Los mapas de peligros geológicos (inundación, deslizamientos, huaycos) deben constituir una capa de información obligatoria para la aprobación de proyectos urbanos
- Definición de áreas de expansión: Priorizar el crecimiento urbano hacia las Zonas 1 y 3 (aptas), condicionar hacia Zonas 2 y 4 (condicionadas) y restringir en Zona 5 (no apta)

2. Gestión del Riesgo de Desastres:

- Planes de contingencia: Utilizar la zonificación de riesgos para la elaboración de planes de emergencia y evacuación
- Sistema de alerta temprana: Identificar sectores críticos para la instalación de sistemas de monitoreo y alerta
- Fondos de reconstrucción: Priorizar inversiones en áreas identificadas como de mayor vulnerabilidad geotécnica

3. Regulación de Construcciones:

- Normativa de construcción diferenciada: Establecer exigencias técnicas específicas según la zona geotécnica:
 - Zonas aptas: Requisitos estándar según RNE
 - Zonas condicionadas: Exigencia de estudios geotécnicos detallados, restricciones de altura, sistemas de drenaje obligatorios

- Zonas no aptas: Prohibición de construcciones nuevas, reubicación de asentamientos existentes
- Requisitos para licencias de construcción: La zonificación geotécnica debe ser un anexo obligatorio en los expedientes técnicos de edificación, verificando la compatibilidad del proyecto con las condiciones del terreno

8.5.2 Aplicaciones Prácticas para Diferentes Actores

Para las Autoridades Municipales:

- Herramienta de aprobación de proyectos: Los mapas de zonificación sirven como criterio técnico para la aprobación de licencias de construcción, subdivisiones de terrenos y proyectos de infraestructura
- Base para normativas locales: Los resultados permiten actualizar las ordenanzas municipales sobre requisitos de cimentación, altura de edificaciones y restricciones en áreas de riesgo
- Planificación de inversión pública: Priorizar proyectos de infraestructura en áreas con condiciones geotécnicas favorables, reduciendo costos de mitigación y mantenimiento

Para los Profesionales de la Ingeniería:

- Fase preliminar de diseño: Los mapas de zonificación permiten una primera aproximación de las condiciones del terreno antes de los estudios detallados
- Selección de tipo de cimentación: Con base en la zonificación, se puede predefinir el tipo de cimentación más adecuado para cada sector

- Estimación de costos: Los parámetros geotécnicos por zona facilitan la estimación preliminar de costos de cimentación y mitigación
- Reducción de incertidumbre: La información geotécnica previa reduce el riesgo de imprevistos durante la construcción

Para los Planificadores Urbanos:

- Densificación urbana: Identificar áreas donde se puede densificar (Zona 1 y 3) y áreas donde se debe limitar (Zona 5)
- Localización de equipamientos: Ubicar infraestructura crítica (hospitales, colegios, centros de emergencia) en zonas con mejores condiciones geotécnicas
- Corredores viales: Planificar vías principales en suelos con buena capacidad de soporte y baja compresibilidad

Para los Gestores de Riesgo:

- Identificación de vulnerabilidades: Mapear áreas con mayor susceptibilidad a deslizamientos, inundaciones y licuación
- Priorización de intervenciones: Enfocar recursos de mitigación en sectores de mayor riesgo
- Planificación de reubicaciones: Identificar asentamientos en zonas no aptas que requieren reubicación prioritaria

8.5.3 Propuesta de Actualización y Mantenimiento

Para garantizar la vigencia y utilidad de la zonificación geotécnica, se propone:

1. Actualización Periódica:

- Revisión quinquenal: Actualizar la información geotécnica cada 5 años o ante eventos sísmicos significativos
- Incorporación de nuevos datos: Añadir información de nuevos proyectos de exploración geotécnica en el área
- Validación de parámetros: Contrastar los parámetros de diseño con el comportamiento observado en obras existentes

2. Implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) Municipal:

- Plataforma digital: Desarrollar un portal web con los mapas de zonificación interactivos
- Consulta ciudadana: Facilitar el acceso a la información geotécnica para propietarios y constructores
- Actualización colaborativa: Permitir la incorporación de nuevos datos geotécnicos de proyectos privados (con revisión técnica)

3. Fortalecimiento de Capacidades:

- Capacitación municipal: Formar al personal técnico de la municipalidad en el uso e interpretación de los mapas de zonificación
- Guías técnicas: Elaborar documentos de fácil comprensión sobre las implicancias de la zonificación para constructores y ciudadanos
- Asistencia técnica: Establecer un servicio de consultoría técnica para orientar sobre la aplicación de la zonificación en proyectos específicos

8.5.4 Marco Normativo Propuesto

Se recomienda la incorporación de los resultados de esta investigación en los siguientes instrumentos normativos:

1. Ordenanza Municipal de Zonificación Geotécnica:

- Definir las zonas aptas, condicionadas y no aptas para la construcción
- Establecer requisitos técnicos diferenciados por zona
- Definir procedimientos de evaluación geotécnica según tipo de proyecto y zona

2. Actualización del Plan de Desarrollo Urbano:

- Incorporar los mapas de zonificación como anexo del plan
- Definir estrategias de crecimiento urbano basadas en la aptitud geotécnica
- Establecer áreas de protección y restricción urbana

3. Reglamento de Construcción Local:

- Exigir estudios geotécnicos según zona y tipo de edificación
- Definir parámetros de diseño mínimo (capacidad portante, profundidad de cimentación)
- Establecer requisitos de compactación y control de calidad

4. Plan de Gestión de Riesgos de Desastres:

- Identificar zonas de alto riesgo geológico

- Definir medidas de mitigación y prevención
- Establecer sistemas de monitoreo y alerta temprana

8.5.5 Beneficios Esperados de la Implementación

La implementación de la zonificación geotécnica como herramienta de gestión territorial generará los siguientes beneficios:

1. Seguridad de la Población:

- Reducción del riesgo de fallas estructurales por asentamientos diferenciales
- Prevención de desastres asociados a procesos geodinámicos (deslizamientos, inundaciones)
- Protección de vidas humanas y patrimonio construido

2. Eficiencia Económica:

- Optimización del diseño de cimentaciones (costos ajustados a condiciones reales del terreno)
- Reducción de sobre costos por imprevistos geotécnicos
- Priorización de inversión pública en áreas con mejor relación costo-beneficio

3. Sostenibilidad Urbana:

- Crecimiento urbano ordenado y planificado
- Ocupación racional del territorio evitando áreas de riesgo

- Reducción de la vulnerabilidad frente a eventos naturales

4. Certidumbre Técnica:

- Información confiable para la toma de decisiones de inversión
- Reducción de la incertidumbre en proyectos de construcción
- Base técnica para la elaboración de normativas locales.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Pandavenes, O. M. (2024). Técnicas de sísmica pasiva HVSR aplicadas a la geotecnia. Aplicación al estudio de movimientos en masa en la planificación territorial e infraestructura civil en Ecuador. *Técnicas de Sísmica Pasiva HVSR Aplicadas a La Geotecnia. Aplicación al Estudio de Movimientos En Masa En La Planificación Territorial e Infraestructura Civil En Ecuador*.
- Alvarez Caso, F. G., & Farfan Huamanga, E. (2021). *Zonificación geotécnica para la expansión urbana de la localidad de Lamay, distrito de Lamay, provincia de Calca, región Cusco*. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/5895>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (n.d.). *Normas ASTM | Normas ASTM en español*. Retrieved July 3, 2026, from <https://regional.astm.org/es/standards?msclkid=8a683c396e5a13210215567023af0051>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2021). *Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. <https://doi.org/10.1520/D1557-12R21>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2025). *Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. <https://doi.org/10.1520/D2487-17R25>
- ASTM. (2020). *Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. https://doi.org/10.1520/D2435_D2435M-11R20
- ASTM. (2021). *Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils*. <https://doi.org/10.1520/D1883-21>
- Astocondor Peñarrieta, D. (2020). *Estudio de zonificación de los suelos para fines de cimentación superficial del sector Pómape del distrito de Monsefú - Chiclayo*.
- Bowles, J. E. (1992). Engineering properties of soils and their measurement. *Engineering Properties of Soils and Their Measurement.*, 241. https://books.google.com/books/about/Engineering_Properties_of_Soils_and_Thei.html?hl=es&id=KNmnQgAACAAJ
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design [International Edition]*. https://books.google.com/books/about/Foundation_Analysis_and_Design.html?hl=es&id=iuBwtgAACAAJ

- Burga Hernández, L. F., & Macuri Templadera, R. K. (2024). *Evaluación de la autoconstrucción informal y su influencia en la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de la zona R de Huaycán - Ate, 2023*.
- Butrón Quispe, M. R. (2015). “*Análisis de ciudades intermedias y el proceso de urbanización*” caso: Juliaca – Peru. Universitat Politècnica de Catalunya. <https://hdl.handle.net/2117/80132>
- Calderón Paniagua, D. G., Quispe Vilca, G. R., Pacompia Toza, J. F., Flores Choquecota, H., Condori Gomez, F. R., & Callata Vidal, J. C. (2026). Autoconstrucción informal y vulnerabilidad sísmica: una aproximación desde la percepción ciudadana. *Revista InveCom*, 6(2). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.17080698>
- Coduto, D. P. ., Kitch, W. A. ., & Yeung, M. Ronald. (2016). *Foundation design : principles and practices*. 960. https://books.google.com/books/about/Foundation_Design.html?hl=es&id=m9C_oQEACAAJ
- Craig, R. F., & Knappett, J. A. (2012). Craig’s Soil Mechanics, Eighth edition. *Craig’s Soil Mechanics, Eighth Edition*, 1–554. <https://doi.org/10.1201/B12841/CRAIG-SOIL-MECHANICS-CRAIG-JONATHAN-KNAPPETT/RIGHTS-AND-PERMISSIONS>
- Dammert-Guardia, M., Obregón, D. T., Zeballos, C., Palacios, R. J., Martínez, A., Aiquipa, A., & Tuanama, M. (2024). *Proyecto Crecimiento urbano irregular e informal en Arequipa, Lima y Tacna (resumen)*. <https://cisepa.pucp.edu.pe/>
- Das, B. M. . (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. https://books.google.com/books/about/Fundamentos_de_ingenier%C3%A0Da_geot%C3%A0cnica.html?hl=es&id=r2ODVVr0r_4C
- García León, M. J. (2022). *Importancia de los resultados obtenidos mediante el ensayo de penetración estándar en el diseño de las cimentaciones superficiales*. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/3485>
- Guerra Torralbo, J. Carlos. (2017). *Mecánica de suelos*. Dextra Editorial. <https://www.perlego.com/es/book/2051344/mecnica-de-suelos-conceptos-bsicos-y-aplicaciones-pdf>
- Huaman Cusiquispe, M. A., & Surco Escalante, S. (2024). *Zonificación geológica-Geotécnica para la expansión urbana del centro poblado de Huasao, distrito de Oropesa, provincia de Quispicanchi – Cusco 2023*.

- INACAL. (2015). *NTP 339.154 2001 (revisada el 2015)*.
https://tiendavirtual.inacal.gob.pe/0/modulos/TIE/TIE_DetallarProducto.aspx?PRO=4011
- INACAL. (2017). *NTP 339.171:2002 (revisada el 2017)*.
https://tiendavirtual.inacal.gob.pe/0/modulos/TIE/TIE_DetallarProducto.aspx?PRO=6295
- INACAL. (2019). *NTP 339.141:1999 (revisada el 2019) - Portal INACAL*.
https://tiendavirtual.inacal.gob.pe/0/modulos/TIE/TIE_DetallarProducto.aspx?PRO=7848
- INACAL - Instituto Nacional de Calidad. (2019). *NTP 339.134:1999 (revisada el 2019)*.
https://tiendavirtual.inacal.gob.pe/0/modulos/TIE/TIE_DetallarProducto.aspx?PRO=7882
- INEI. (2018). *Censos Nacionales 2017 – XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. <https://censo2017.inei.gob.pe/>
- Masís-Flores, D. E. (2017). *Zonificación y caracterización geotécnica de los suelos de la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/2238/7275>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones - MTC. (2016). *Manual Ensayo de Materiales*.
- Ministerio de Vivienda, C. y S. (2021). *Reglamento Nacional de Edificaciones - RNE*.
<https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Municipalidad Distrital de Santa María del Mar. (2016, July). *E.050 Suelos y Cimentaciones - Informes y publicaciones - Municipalidad Distrital de Santa María del Mar - Plataforma del Estado Peruano*.
<https://www.gob.pe/institucion/munisantamariadelmar/informes-publicaciones/2619712-e-050-suelos-y-cimentaciones>
- MVCS. (2021, November). *Reglamento Nacional de Edificaciones - RNE - Informes y publicaciones - Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento - Plataforma del Estado Peruano*. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Palacio-Pacheco, O. V., Vanegas-Padilla, A. P., Cadena-Carrillo, G., & Ortega-Sinning, E. R. (2021). *Zonificación geotécnica de los suelos de la ciudad de*

- Valledupar mediante utilización de un SIG. *Revista Politécnica*, 17(33), 109–119. <https://doi.org/10.33571/RPOLITEC.V17N33A9>
- Pasquel Cotrina, A. A. (2022). Zonificación geotécnica para el diseño de cimentaciones de viviendas unifamiliares de hasta 3 pisos en el centro poblado quicacán, 2021. *Universidad de Huánuco*. <https://repositorio.udh.edu.pe/handle/20.500.14257/3534>
- Peirano, G., Enrique de la Flor Sáenz Director Ejecutivo del Ceplan Jordy Vilchez Astucuri, L., Sobrino Vidal, E., del Águila Patroni, F., & Francisco Torres Editado por, M. (2023). *Análisis de la vulnerabilidad ante peligros en zonas costeras y de valles a nivel nacional y el impacto a nivel regional*. www.ceplan.gob.pe
- Quispesivana Quispe, L. J. (1996). Geología del cuadrángulo de Huánuco. Hoja: 20-k – [Boletín A 75]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/198>
- Terzaghi, K. (1995). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. El Ateneo. https://books.google.com.pe/books/about/Mec%C3%A1nica_de_suelos_en_la_ingenieria_pr.html?id=C7d3AQAACAAJ&redir_esc=y
- Terzaghi, Karl., Peck, R. B. , & Mesri, Gholamreza. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. 549.
- Vilela, M., & Moschela, P. (2017). *Paisaje y expansión urbana sobre espacios naturales en ciudades intermedias. El caso de Purumpampa en Huamachuco, La Libertad, Perú*.
- Villalobos Jara, F. Alberto. (2016). *Mecánica de suelos*. https://books.google.com/books/about/Mec%C3%A1nica_de_Suelos.html?hl=es&id=1ALpDwAAQBAJ
- Vincent, E., & Mallo, S. J. (2023). Geotechnical investigation of the sub-soils condition around Yelwa North central part of Nigeria For the construction of infrastructures. *Nigerian Journal of Technology*, 42(1), 99–106. <https://doi.org/10.4314/NJT.V42I1.12>



Dirección legal: Urb. Paseo del Mar
Nuevo Chimbote, Santa, Ancash
Correo electrónico: ed.honexus@gmail.com
Teléfono: 978653152

ISBN: 978-612-99401-8-2

