

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“CORRELACIONES DE PARÁMETROS MECÁNICOS
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL CONO DE
PENETRACIÓN DINÁMICO (DCP) Y LA RELACIÓN DE
SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR), SUELOS DE LA
PROVINCIA DE NAPO, ECUADOR.”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN GEOTECNIA

Presentado por:

IDANIA ALEJANDRA LEÓN YUMBO

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año –2025

Dedicatoria

El proyecto está dedicado a los profesionales ingenieros civiles proyectistas de mi cantón Archidona para que puedan hacer uso de las correlaciones de las propiedades mecánicas del suelo de presentadas para el diseño vial y estructural sobre el suelo encontrado en la zona urbana del cantón.

Agradecimientos

Agradecer a mi familia por ser mi soporte para soñar y perseverar en el tiempo, en especial a mi roca, mi madre. A la empresa Geateccompany Cia. Ltda. Que me proporcionó todas las facilidades para la ejecución de ensayos necesarios para cumplir con el objeto de este proyecto.

Declaración expresa

Yo Idania Alejandra León Yumbo acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 25 de septiembre de 2025

Idania Alejandra León Yumbo

Evaluadores

Ph. D. Davide Besenzon Venegas

Profesor de Materia

Ph. D. Samantha Jiménez Oyola

Profesor de Materia

Ph.D Jaime Bojorque Iñiguez

Tutor del proyecto

Resumen

En Ecuador, la planificación de proyectos viales y en particular en la provincia de Napo enfrenta serias limitaciones debido a la escasez de recursos destinados a estudios geotécnicos exhaustivos. Esta carencia impide que, en muchos casos, se obtenga información detallada sobre las condiciones del terreno, lo que afecta la calidad y sostenibilidad de las obras. Frente a este panorama, se plantea como alternativa la utilización del ensayo de Cono de Penetración Dinámico (DCP) para estimar de manera económica la capacidad de soporte del suelo, expresada en términos de California Bearing Ratio (CBR). El estudio consistió en analizar la relación entre los valores obtenidos mediante el DCP y diversas propiedades mecánicas del suelo. Para ello, se recopilieron 14 muestras representativas, seleccionadas de forma aleatoria, a las que se aplicaron ensayos normalizados bajo las especificaciones ASTM. Se determinaron parámetros como densidad seca máxima, humedad óptima, resistencia a la penetración, límites de consistencia y distribución granulométrica. Con los datos obtenidos se desarrollaron modelos de predicción del CBR. El primero, de naturaleza potencial, alcanzó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.973$. El segundo modelo, construido a partir de una regresión lineal múltiple que incorporó la densidad seca máxima, la humedad óptima y los resultados del DCP, arrojó un coeficiente de correlación múltiple de 0.908.

Palabras Clave: Geotecnia, mecánica de suelos, ensayo de cono de penetración dinámico, DCP, California Bearing Ratio, CBR, correlaciones geotécnicas, capacidad portante, infraestructura vial, Ecuador, Napo.

Abstract

In Ecuador, and particularly in Napo Province, road project planning faces significant challenges due to the limited availability of resources for conducting comprehensive geotechnical studies. This constraint often prevents the acquisition of detailed information on soil conditions, which in turn affects the quality and sustainability of infrastructure works. To address this issue, the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) test is proposed as a cost-effective alternative for estimating soil bearing capacity, expressed in terms of the California Bearing Ratio (CBR). This study aimed to analyze the relationship between the values obtained through the DCP test and various mechanical properties of the soil. Fourteen representative samples were randomly collected and subjected to laboratory tests standardized under ASTM specifications. The parameters determined included maximum dry density, optimum moisture content, penetration resistance, Atterberg limits, and grain size distribution. Based on the data obtained, CBR prediction models were developed. The first of a potential nature, achieved a coefficient of determination of $R^2 = 0.973$. The second model, developed through multiple linear regression and incorporating maximum dry density, optimum moisture content, and DCP results, yielded a multiple correlation coefficient of 0.908.

Keywords: *Geotechnics, soil mechanics, Dynamic Cone Penetrometer test, DCP, California Bearing Ratio, CBR, geotechnical correlations, bearing capacity, road infrastructure, Ecuador, Napo.*

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas.....	V
Índice de tablas.....	VI
Índice de figuras.....	VII
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Descripción del problema	4
1.3. Justificación del problema	5
1.4. Objetivos	7
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	7
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	7
1.5. Ubicación y descripción del área de estudio	8
1.6. Fundamentación teórica de la Investigación	15
1.6.1. <i>Estudio geotécnico</i>	16
1.6.2. <i>Estudio geotécnico preliminar</i>	17
1.6.3. <i>Californian Bearing Ratio (CBR) y sus Aplicaciones</i>	17
1.6.4. <i>Penetración de cono dinámico (DCP) y sus Aplicaciones</i>	18
1.6.5. <i>Correlaciones entre CBR y DCP</i>	18
Capítulo 2	25
2. Metodología	26
2.1. Plan de Trabajo	26
2.2. Ensayos de Campo	27
2.2.1. <i>Ensayo de Cono de Arena</i>	27
2.2.2. <i>Ensayo de Penetración de Cono Dinámico</i>	29
2.3. Ensayos de Laboratorio.....	30
2.3.1. <i>Granulometría (ASTM D6913)</i>	31
2.3.2. <i>Proctor modificado (ASTM D1557)</i>	31
2.3.3. <i>Límites de Atterberg (ASTM D4318)</i>	32
2.3.4. <i>Relación de Soporte de California CBR (ASTM D1883)</i>	34
2.3.5. <i>Contenido de Humedad (ASTM D2216)</i>	35

2.4.	Procesamiento de Datos y Análisis de Resultados	36
2.4.1.	<i>Propuestas de Correlación</i>	36
Capítulo 3	39
3.1.	Resultados	40
3.1.1.	<i>Ubicación y muestreo</i>	41
3.1.2.	<i>Resultados de ensayos de campo</i>	43
3.1.3.	<i>Resultados de ensayos de laboratorio</i>	44
3.2.	Análisis de resultados.....	52
Capítulo 4	63
4.	Conclusiones y Recomendaciones	64
4.1.	Conclusiones.....	64
4.2.	Recomendaciones.....	65
Referencias	66

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
CBR	California Bearing Ratio (Relación de Soporte de California)
CHO	Contenido de Humedad Óptima
COE	Comité de Operaciones de Emergencia
DCP	Dynamic Cone Penetrometer (Cono de Penetración Dinámico)
DN	Deformación Normalizada (mm/golpe en ensayo DCP)
GADM	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal
IP	Índice de Plasticidad
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
MDS	Máxima Densidad Seca
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
NEC	Norma Ecuatoriana de Construcción
PDyOT	Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial
PUGS	Plan de Uso y Gestión de Suelo
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System)
UTM	Universal Transversal de Mercator (Sistema de coordenadas de proyección cartográfica)
WGS	World Geodetic System 1984 (Sistema Geodésico Mundial 1984)

Índice de tablas

Tabla 1 Coordenadas de zona de estudio.....	8
Tabla 2 Cobertura vial en zona de estudio.....	10
Tabla 3 Correlaciones existentes entre CBR y DCP	19
Tabla 4 Clasificación de correlación según valor r	38
Tabla 5 Ubicación de los puntos de muestreo.....	41
Tabla 6 Resultados de ensayo de densidad en campo por Cono de Arena	43
Tabla 7 Resultados del ensayo DCP	44
Tabla 8 Resultados de Clasificación SUCS	45
Tabla 9 Resultados de ensayo de granulometría	48
Tabla 10 Resultados del ensayo Proctor Modificado.....	50
Tabla 11 Resultados del ensayo CBR en laboratorio	52
Tabla 12 Comparativa de resultados CBR de correlaciones existentes y actual investigación	54
Tabla 13 Resultados de la regresión lineal múltiple	56
Tabla 14 Resultados de los coeficientes de función lineal múltiple	57
Tabla 15 Valores de comparación entre CBR Laboratorio y las funciones de correlación CBR.....	58
Tabla 16 Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales entre CBR y ecuación 5	60
Tabla 17 Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales entre CBR y ecuación 6	61

Índice de figuras

Figura 1 Ubicación del área de estudio.	9
Figura 2 Distribución de cobertura vial dentro de la zona de estudio	11
Figura 3 Cobertura vial del casco urbano de Archidona.	12
Figura 4 Geología del Cantón Archidona.....	13
Figura 5 Geología en área de estudio.	14
Figura 6 Esquema conceptual de la regresión lineal múltiple utilizada en el estudio ..	22
Figura 7 Comparación entre distribución t Student y Normal.....	23
Figura 8 Esquema de prueba de hipótesis bilateral con $\alpha=0,05$	24
Figura 9 Set para ensayo de Cono de Arena.....	29
Figura 10 Ensayo DCP en campo	30
Figura 11 Set para ensayo Proctor Modificado	32
Figura 12 Set ensayo Límite líquido	33
Figura 13 Ensayo CBR.....	35
Figura 14 Horno de laboratorio.....	36
Figura 15 Distribución de puntos de muestreo por barrios del cantón Archidona.....	42
Figura 16 Influencia del límite líquido y clasificación SUCS.....	46
Figura 17 Clasificación SUCS del suelo subrasante de las 14 muestras dentro del cantón	47
Figura 18 Resultados del ensayo de Granulometría.....	49
Figura 19 Influencia de los resultados de Proctor Modificado.....	51
Figura 20 Comparación de Modelos de Correlación Potencial y Logarítmica entre DN y CBR (0.1").....	53
Figura 21 Comparativa de resultados CBR con correlaciones existentes y actual.....	55
Figura 22 Comparación CBR Laboratorio- funciones de correlación CBR y DCP.....	57
Figura 23 Comparación CBR de laboratorio vs. CBR estimado.....	59

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Antecedentes

En la provincia de Napo, la situación de la red vial es compleja. Varios tramos muestran deficiencias importantes vinculadas con el comportamiento geotécnico, en especial con la estabilidad de taludes y la capacidad portante de la subrasante. Este escenario se ve agravado por el régimen climático propio de la Amazonía ecuatoriana, donde las lluvias persistentes, la elevada humedad y la meteorización acelerada de los materiales generan un desgaste constante y acelerado de la infraestructura.

Un caso emblemático es la vía Papallacta – Baeza – Cosanga – Y de Narupa – Cotundo, que atraviesa los cantones Quijos y Archidona. En 2019, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) emitió el Acuerdo Ministerial N.º 022-2019, declarando este tramo en emergencia vial. La intervención demandó una inversión estatal de USD 7'784.495,74 para la rehabilitación de 36 kilómetros de la Red Vial Estatal E20. La obra fue entregada en 2020, pero pocos meses después, entre mayo y agosto, aparecieron nuevamente fallas estructurales. Las inspecciones atribuyeron estos daños a problemas geotécnicos no resueltos y a condiciones ambientales extremas.

En los últimos años, el deterioro de esta vía y de otras rutas estratégicas ha motivado constantes declaratorias de emergencia. El COE Provincial de Napo ha debido convocar sesiones extraordinarias para atender deslizamientos, aluviones, inundaciones y socavamientos que interrumpen la conectividad. Entre los eventos más graves se encuentra el colapso parcial del puente sobre el río Guango, la pérdida de alrededor del 70 % de la calzada en el sector Laurel y daños en puentes e infraestructura hídrica en Cosanga, El Chaco y Quijos. Según el Sitrep N° 5, emitido entre el 30 de junio y el 5 de julio de 2025, se contabilizaron 38 incidentes de este tipo en un solo período de monitoreo. El 5 de julio de 2025, el Gobierno Nacional decretó el estado de emergencia vial por 60 días para toda la red vial estatal de Napo, permitiendo así la asignación inmediata de recursos para la atención de puntos críticos y el restablecimiento de la movilidad. En paralelo, el COE

Cantonal de Quijos exigió mantener esta declaratoria para garantizar intervenciones rápidas y oportunas en beneficio de la población afectada.

Este contexto deja en evidencia la necesidad de fortalecer la caracterización geotécnica en la fase de diseño de los proyectos viales. Evaluar de forma precisa la capacidad de carga de la subrasante y comprender el marco geológico de la zona son pasos imprescindibles para prevenir fallas prematuras, siempre alineados con las normativas ecuatorianas y estándares internacionales. En este sentido, el pavimento concebido como una estructura sometida a cargas repetidas requiere parámetros de diseño fiables, como el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de resiliencia, ambos estrechamente relacionados con el valor de soporte del suelo medido como California Bearing Ratio (CBR).

Para determinar la resistencia del suelo se utilizan diversos métodos, entre los cuales destacan el ensayo de Cono de Penetración Dinámico (DCP), regulado por la norma ASTM D6951, y el ensayo CBR, especificado en la norma ASTM D1883. El DCP, desarrollado en 1956, ha demostrado ser un método eficaz y rápido para evaluar la resistencia del suelo (León Calderón, 2017). En ingeniería vial, el CBR es una referencia clave para el diseño de pavimentos, pero su obtención directa en laboratorio implica costos y tiempos superiores en comparación con el DCP. En muchos casos, las diferencias económicas alcanzan entre un 150 % y 200 % de reducción a favor del DCP, lo que, sumado a su rapidez, lo convierte en una opción muy atractiva para la toma de decisiones en fases tempranas de un proyecto.

Sin embargo, predecir el CBR a partir del DCP no es un proceso directo, ya que influyen factores como la naturaleza del suelo, el grado de compactación y las condiciones climáticas, tal como señalan Monteiro, de Oliveira, Zitllau, de Aguiar y de Carvalho (2016). Investigaciones previas han demostrado que parámetros como los límites de Atterberg, la densidad seca máxima y la humedad óptima guardan una relación directa con el CBR (Lim, Wijeyesekera y Bakar, 2014). Aunque Livneh (1987) recopiló más de 20 correlaciones exitosas entre ambas pruebas, varios autores coinciden en que estas relaciones deben

adaptarse a las características geotécnicas locales. Por ello, generar correlaciones específicas para la provincia de Napo se presenta como una oportunidad clave para mejorar la precisión en la estimación del CBR a partir del DCP, optimizando recursos y aumentando la confiabilidad de los diseños viales en esta región amazónica.

1.2. Descripción del problema

En la fase preliminar de la mayoría de los proyectos viales, la toma de decisiones suele basarse en información secundaria, especialmente cuando se trabaja a nivel de prefactibilidad. Entre los parámetros esenciales para el diseño de pavimentos, el California Bearing Ratio (CBR) ocupa un lugar central, pues define la capacidad de soporte del suelo y condiciona el espesor y tipo de estructura a utilizar. Sin embargo, el ensayo CBR tradicional es un procedimiento exigente en cuanto a tiempo, logística y costo: requiere la extracción de muestras, su compactación en moldes específicos, un periodo de saturación en agua de hasta 96 horas y, finalmente, la aplicación de carga controlada en laboratorio. Este proceso, desde la recolección hasta la obtención de resultados, suele extenderse entre 4 y 5 días. En el contexto ecuatoriano, cada ensayo puede costar entre 150 y 200 dólares estadounidenses, cifra que en proyectos con múltiples puntos de muestreo representa un gasto considerable.

Frente a esta realidad, el ensayo de Cono de Penetración Dinámico (DCP), regulado por la norma ASTM D6951, surge como una opción práctica y mucho más ágil. La técnica consiste en medir la profundidad de penetración de un cono metálico en el suelo, provocada por impactos repetidos de un martillo con masa y altura de caída estandarizadas. Su principal ventaja radica en que los resultados se obtienen de forma inmediata en el mismo sitio de prueba, permitiendo que un equipo de campo ejecute de 10 a 15 mediciones en una sola jornada. En Ecuador, el costo promedio de un ensayo DCP se ubica entre 40 y 70 dólares, lo que implica una reducción sustancial en algunos casos superior al 150 % respecto al costo del CBR convencional, además de una importante disminución en tiempos de espera.

Disponer de correlaciones confiables que vinculen los valores obtenidos con el DCP y el CBR, complementadas con datos básicos como los límites de consistencia, permitiría a los ingenieros de la región tomar decisiones más rápidas y fundamentadas, optimizando recursos y reduciendo gastos de caracterización geotécnica. Esta estrategia resulta especialmente valiosa en zonas como la provincia de Napo, donde las limitaciones presupuestarias y la urgencia de rehabilitar vías críticas hacen indispensable el empleo de metodologías más eficientes.

1.3. Justificación del problema

Comprender la relación entre los resultados del Cono de Penetración Dinámico (DCP), el California Bearing Ratio (CBR) y las propiedades mecánicas del suelo es fundamental para desarrollar diseños preliminares que contemplen factores de seguridad adecuados y ajustados a las condiciones reales de cada sector. Contar con un método que permita asociar un ensayo de aplicación rápida y bajo costo con otro que ha demostrado su fiabilidad en múltiples proyectos viales, como el CBR, representa una ventaja técnica y económica para la etapa de planificación.

En varias zonas del país y con mayor frecuencia en regiones rurales y amazónicas la normativa vigente no exige de forma obligatoria estudios completos de mecánica de suelos para el diseño de estructuras de pavimento. Esto provoca que, en muchos casos, las decisiones de diseño se basen en datos limitados o en estimaciones generales, lo que incrementa el riesgo de fallas prematuras. Ante esta realidad, la implementación de metodologías rápidas, de bajo costo y con base técnica comprobada se convierte en una estrategia clave para obtener parámetros geotécnicos que respalden decisiones de ingeniería más seguras y eficientes.

Este trabajo se desarrolla en los barrios Piedra Grande, Las Maravillas y Central, ubicados en el cantón Archidona, provincia de Napo, en plena Amazonía ecuatoriana. La elección de estos sectores responde a la necesidad de mejorar la conectividad local y, al mismo tiempo, a las condiciones particulares del terreno y el clima de la región, que exigen

soluciones de diseño adaptadas a su realidad. Generar correlaciones específicas para este contexto permitirá reducir tiempos y costos en la fase de prediseño, mejorar la calidad de la información disponible para los ingenieros y contribuir a que las soluciones viales sean más duraderas y sostenibles.

La actual investigación se sitúa dentro de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas, estableciendo conexiones directas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular, con tres ODS prioritarios asociados al estudio:

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura: El estudio de correlaciones entre el ensayo de Cono de Penetración Dinámico (DCP) y la Relación de Soporte de California (CBR) aporta al diseño de soluciones de camino más eficiente y accesible. La generación de metodologías técnicas de bajo coste refuerza los procesos de planificación y construcción de infraestructuras resilientes, contribuyendo a la innovación de los métodos de caracterización de suelos en el contexto amazónico.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles: La optimización del diseño preliminar de pavimentos en el cantón Archidona favorece la conectividad y movilidad de las comunidades. El uso de metodologías prácticas y con confianza en la evaluación del suelo mejora la durabilidad de los caminos propagándose, sin duda, a una mejora del acceso seguro a los servicios básicos, educación y salud, aumentando la calidad de vida de sus habitantes.

ODS 13: Acción por el clima: El planteamiento de alternativas técnicas de menores costes y tiempos en la fase de estudios geotécnicos también significa un menor impacto ambiental al reducir el uso de ensayos extensivos y de recursos materiales y energéticos. Adaptar las correlaciones a las características geotécnicas y climáticas de la Amazonía responde a la necesidad de ir generando infraestructuras resilientes ante eventos climáticos extremos propios de la Amazonía.

La propuesta es importante desde una doble vertiente, tanto la técnica-científica como aquella que va en la línea del desarrollo sostenible contribuyendo a aumentar la

infraestructura y las condiciones de vida de las poblaciones amazónicas lógicas y coherentes con la Agenda 2030.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Analizar las posibles correlaciones entre el valor de soporte del suelo medido como California Bearing Ratio (CBR) y diversas propiedades mecánicas del suelo, tales como los límites de consistencia, la densidad en campo determinada mediante el método del cono de arena, la distribución granulométrica, los resultados del ensayo de Cono de Penetración Dinámico (DCP) y los parámetros obtenidos con el Proctor modificado, con el propósito de caracterizar suelos representativos de los barrios Piedra Grande, Las Maravillas y Central, en el cantón Archidona, provincia de Napo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar la bibliografía y los antecedentes técnicos relacionados con las correlaciones entre distintos ensayos geotécnicos, con el propósito de establecer una base teórica sólida para el desarrollo del estudio.
- Obtener en laboratorio y en campo los valores de California Bearing Ratio (CBR), Cono de Penetración Dinámico (DCP), densidad máxima seca, contenido de humedad óptima, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad correspondientes a los diferentes tipos de suelos presentes en los barrios Piedra Grande, Las Maravillas y Central, en el cantón Archidona, provincia de Napo.
- Evaluar las posibles correlaciones entre los resultados de los ensayos CBR y DCP, así como con la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptima, para los suelos característicos de los sectores estudiados, con el fin de identificar relaciones representativas que puedan ser utilizadas como referencia en la región.

- Proponer recomendaciones técnicas para la aplicación de las correlaciones obtenidas, de manera que contribuyan a optimizar el diseño preliminar de pavimentos en contextos geotécnicos y ambientales similares al del presente estudio.

1.5. Ubicación y descripción del área de estudio

La zona de estudio está ubicada en el cantón Archidona el cual pertenece a la provincia del Napo. Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantonal (PDyOT) y Plan de Uso y Gestión de Suelo (PUGS) vigentes, la zona de influencia se encuentra dentro del límite urbano de la cabecera cantonal.

El área de estudio se ilustra en la **Figura 1**, se ubica en la parte sur este del cantón, específicamente dentro de la parroquia Archidona, considerada como cabecera cantonal. Se localiza dentro de las coordenadas UTM, Datum WGS-84, Meridiano 18 Sur, se detalla las coordenadas principales del polígono de intervención en la Tabla 1.

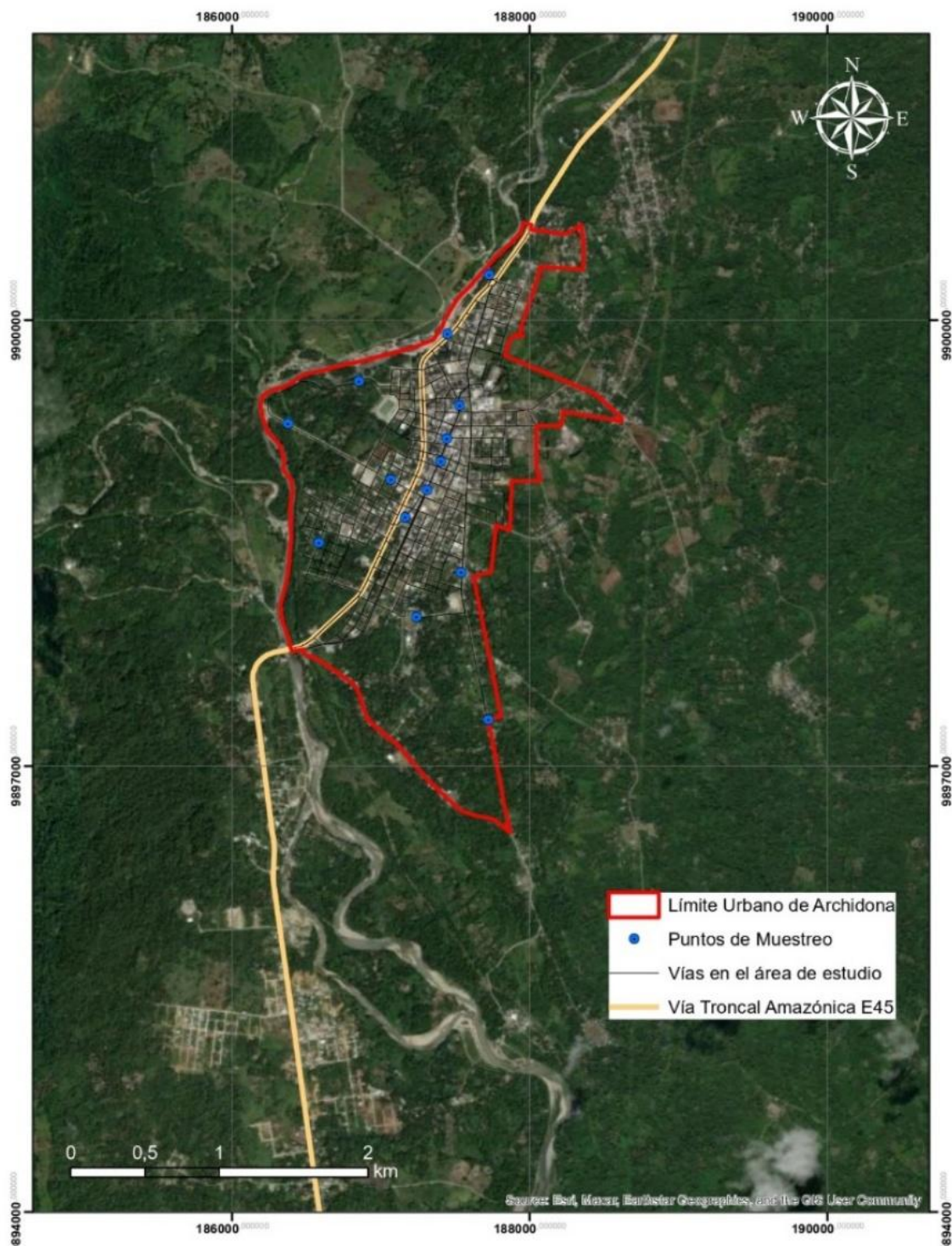
Tabla 1

Coordenadas de zona de estudio

Orientación	Coordenadas	
	Este (m)	Norte (m)
Norte	187965.03	9900641.49
Sur	188074.10	9898916.27
Este	186348.88	9899005.51
Oeste	187865.88	9896536.66

Figura 1

Ubicación del área de estudio



Nota. Obtenido de PUGS GADM Archidona

Según el PDyOT, el cantón Archidona posee un clima cálido-húmedo, con precipitaciones que varían entre los 4,000 y 5,000 milímetros anuales, y tiene una

temperatura media de 24°C., la humedad del cantón es del 90 al 100%, la altitud del cantón oscila entre los 577 metros sobre el nivel del mar. La presión atmosférica es de 712 mm.

En la **Figura 3**, que es el correspondiente al PUGS, se puede observar la cobertura vial del área objeto, en la que las vías han sido clasificadas de acuerdo con su estructura de pavimento bajo las siguientes categorías: adoquín; arenisca asfáltica; asfalto, hormigón, lastre; mantenimiento; sin apertura y tierra. Debe aclararse que el material denominado lastre es una capa granular compuesta por piedras trituradas o gravas, utilizada para vías no pavimentadas, para constituir la base o subbase de esta, siendo el soporte estructural, además de permitir el drenaje.

La arenisca asfáltica natural, en cambio, equivale a una mezcla de arenas con contenido natural de betún y es la que presenta un tránsito más estable y resistente que la del suelo sin tratar. En el área objeto de estudio la vía de lastre predomina (51,80 % del total) y la de arenisca asfáltica natural (17,40 %), lo que favoreció el acceso y la obtención de las muestras para el presente estudio. La **Tabla 2** Cobertura vial en zona de estudio muestra todos los tipos de materiales que existen en las vías, su longitud ejecutada y su porcentaje de la longitud total, y la **Figura 2** presenta la distribución porcentual de los distintos tipos de materiales.

Tabla 2

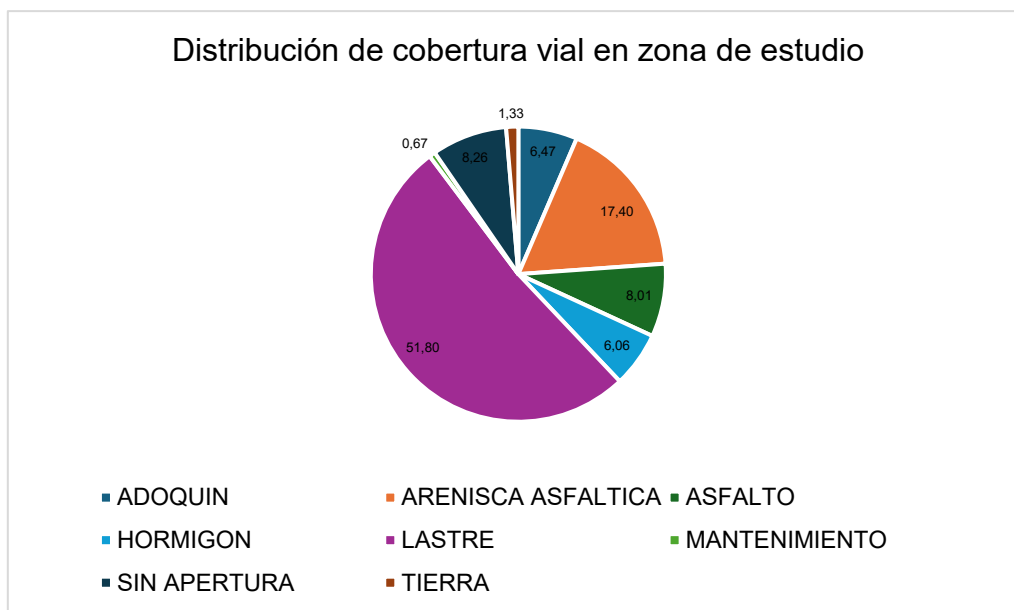
Cobertura vial en zona de estudio

Tipo de material	Longitud (m)	Porcentaje (%)
Adoquín	3369.02	6.47
Arenisca asfáltica	9064.59	17.40
Asfalto	4174.07	8.01
Hormigón	3157.20	6.06
Lastre	26984.06	51.80
Mantenimiento	348.90	0.67
Sin Apertura	4304.41	8.26
Tierra	695.38	1.33

Nota. PUGS-GADM Archidona.

Figura 2

Distribución de cobertura vial dentro de la zona de estudio

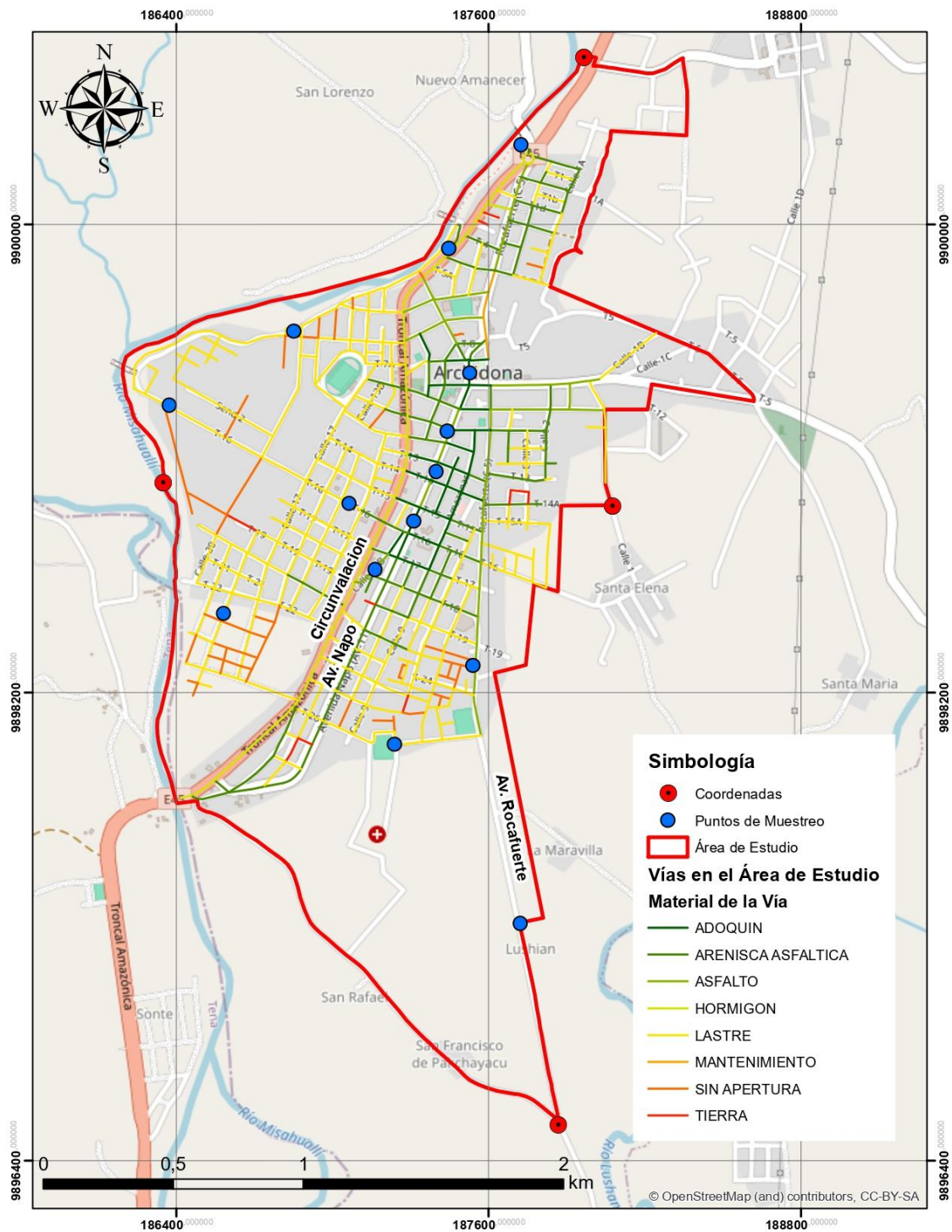


Nota. PUGS GADM Archidona

La **Figura 3** expone con minuciosidad la cobertura vial del núcleo urbano de Archidona, espacialmente circunscrito mediante una línea roja que define el espacio objeto de estudio. En el mapa, se georreferencian hasta 20 puntos de muestreo (puntos de muestreo que en el mapa aparecen representados por círculos de color azul), y coordenadas de referencia (coordenadas que en el mapa aparecen representadas por círculos de color rojo), localizados para garantizar una adecuada representatividad de la red vial. La clasificación de las vías se hace siguiendo una codificación cromática por tipos de materiales de construcción: adoquinado, arenisca asfáltica, asfalto, hormigón, lastre, mantenimiento, sin apertura y tierra, lo que permite observar con claridad la variabilidad de las infraestructuras viales. También aparecen representadas las principales arterias circulatorias: Avenida Napo y Avenida Roca Fuerte, así como las zonas de uso residencial, institucional y de equipamientos urbanos. Por último, la simbología del mapa expresa una escala gráfica de 2 kilómetros, para facilitar la orientación y la lectura espacial del mapa que, en definitiva, actúa como un instrumento de valor para el análisis de las condiciones viales y su relación con la distribución de los puntos de estudio.

Figura 3

Cobertura vial del casco urbano de Archidona

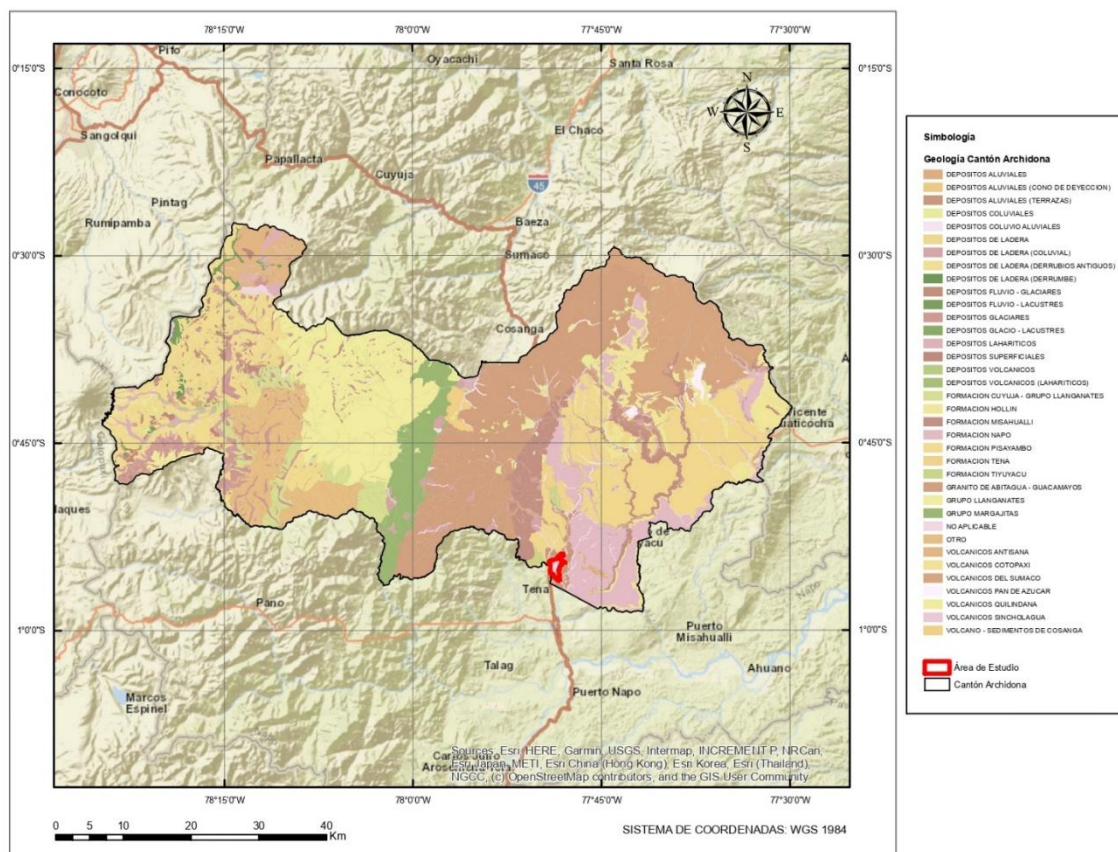


Nota. PUGS GADM Archidona

La **Figura 4** presenta la geología del cantón Archidona, ubicado en la provincia de Napo, Ecuador, representada mediante una detallada clasificación litológica y geomorfológica. La simbología distingue una amplia variedad de depósitos y formaciones

geológicas, incluyendo depósitos aluviales, coluviales, lacustres, glaciares, volcánicos y formaciones rocosas específicas como la Formación Misahuallí y el Grupo Napo. Asimismo, se identifican zonas de origen volcánico asociadas a distintos complejos y estratovolcanes, así como unidades intrusivas y metamórficas. El área de estudio, señalada en color rojo, se encuentra en la zona sur del cantón, próxima a la ciudad de Tena, mientras que el contorno negro delimita el territorio cantonal.

Figura 4
Geología del Cantón Archidona

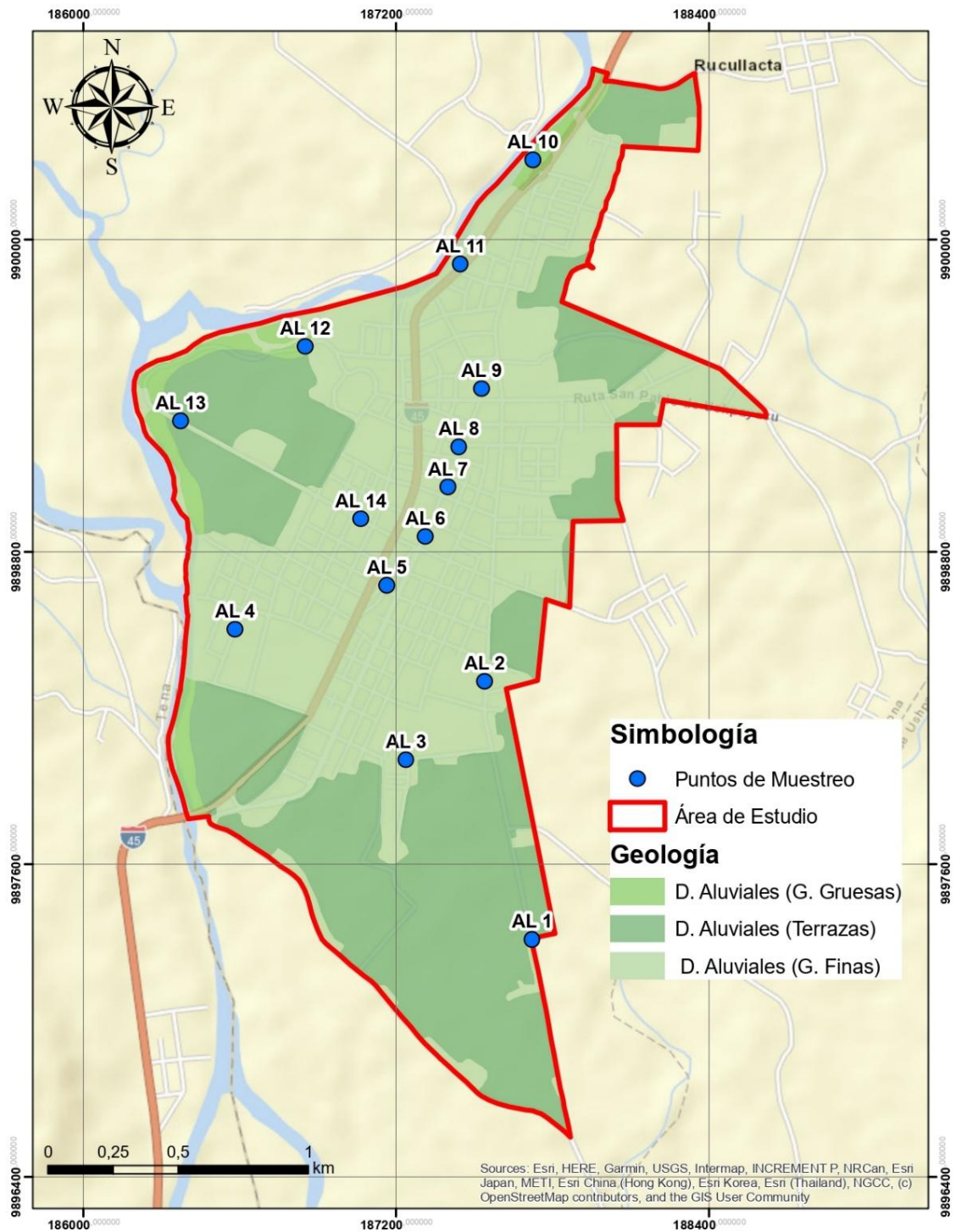


Nota. Instituto Geográfico Militar

La **Figura 5** muestra el área de estudio delimitada en color rojo se encuentra en un contexto de depósitos aluviales de distintas granulometrías: gruesas, terrazas y finas. Dentro del polígono se ubican catorce puntos de muestreo (AL1 a AL14), ilustrados como círculos azules, que pretenden representar el territorio analizado. La carta incluye

referencias geográficas, red vía y sombreado del relieve para una adecuada interpretación de la ubicación de los sitios de muestreo dentro del contexto de la geología de la zona.

Figura 5
Geología en área de estudio



Nota. PUGS GADM Archidona

1.6. Fundamentación teórica de la Investigación

La Ingeniería Geotécnica hace referencia a la aplicación de la tecnología de la Ingeniería Civil al manejo de los materiales térreos de la corteza del planeta (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 1981). Por lo general, un ingeniero de esta rama se debe encargar de investigar los materiales de origen natural que se encuentran al alcance, es decir, en la superficie o a poca profundidad. Ellos han sido los responsables de que estos materiales sean denominados con el nombre de suelo o roca.

En el área de la ingeniería que se encarga del estudio del suelo, lo definen al mismo como “un aglomerado de minerales, materia orgánica y sedimentos, relativamente sin cohesión depositado sobre el lecho de roca” (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 1981). Gracias a que este suelo está compuesto en su mayoría por minerales o partículas orgánicas, es considerado un elemento fácil de romper o disgregar, a su vez, las rocas tienen una mayor consistencia, es decir una resistencia mucho más elevada debido a sus fuerzas moleculares y a su vez, a la cohesión interna, que se encarga de mantener unidos a los minerales de los que está constituido. Esta cualidad de la roca será siempre así, aunque sea parte de una estructura firme o parte de un suelo arcilloso (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 1981).

Además, cuando de suelos se refiere, es importante el estudio de la mecánica de suelos la cual es la rama de la ingeniería geotécnica que engloba la ingeniería mecánica y las propiedades de estos suelos, mientras que, del estudio de las rocas, su ingeniería y propiedades, se encarga la mecánica de rocas (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 1981). La mecánica de suelos aplica los principios básicos de la mecánica, que incluye cinemática, dinámica, mecánica de fluidos y mecánica de materiales a los suelos (Mitchell & Soga, 2005). Es decir, el suelo se relaciona con el agua, el acero, o el concreto, por lo tanto, de aquí nacen los conceptos fundamentales para poder construir cosas en base a dichos principios y elementos estudiados por la ingeniería de materiales.

Un aspecto muy importante para tener en cuenta para el estudio de las propiedades geotécnicas del suelo es la implementación de análisis de laboratorio para obtener información como la plasticidad, compresibilidad, distribución granulométrica y resistencia

cortante. Además, gracias a los avances tecnológicos y la elaboración de nuevas herramientas, hay otros análisis que se realizan in situ y de los cuales se pueden obtener propiedades de resistencia y deformación del suelo, puesto que durante estos análisis no se modifican algunos aspectos de las muestras durante su realización (Das & Sivakugan, 2008). A pesar de esto, el aspecto económico hace imposible la realización de algunos análisis ya sea in situ o de laboratorio ya que algunos pueden llegar a ser muy costoso y obligan al ingeniero encargado a basarse en suposiciones realizadas por él mismo sobre algunas propiedades del suelo para poder completar algunos procesos.

Aquí, la mecánica de suelos es de suma importancia para cualquiera de estos análisis o suposiciones, por lo que es indispensable tener un buen conocimiento de los principios de esta. A la par del dominio de esta información, hay otros aspectos sobre las condiciones en las que se construyen las cimentaciones que por lo general no suelen ser depósitos homogéneos por lo cual juega un papel importante también el dominio de la información geológica del área tanto del origen como de la naturaleza de estratificación del suelo y también de las condiciones del agua en el subsuelo (Das & Sivakugan, 2008).

1.6.1. Estudio geotécnico

En la Norma Ecuatoriana de Construcción, NEC, se detalla que el estudio geotécnico corresponde a *“Actividades que comprenden el reconocimiento de campo, la investigación del subsuelo, los análisis y recomendaciones de ingeniería necesarios para el diseño y construcción de las obras en contacto con el suelo”* (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2023), donde se garantiza y prevé el correcto comportamiento de las estructuras que servirán para las diferentes edificaciones, puentes, torres, silos, entre otras obras, las cuales ayuden a preservar la vida humana, así como también evite la afectación o daño a construcciones vecinas.

1.6.2. Estudio geotécnico preliminar

Así también, las normas NEC definen este tipo de estudio como necesario para poder acercarse a las características geotécnicas de un terreno, con el fin de establecer las condiciones que limitan su aprovechamiento, los problemas potenciales que puedan presentarse, los criterios geotécnicos y parámetros generales para la elaboración de un proyecto.

La NEC menciona que el estudio geotécnico definitivo, está constituido por ciertas actividades indispensables para determinar con exactitud algunas de las características geotécnicas de un terreno, a través de una exploración de campo, ensayos y sondeos. A base de esto se puede establecer las recomendaciones y los parámetros necesarios para el diseño de obras ingenieriles de suelo, que sean cimentaciones, excavaciones o sistemas de contención.

Uno de los objetivos del estudio de campo es obtener muestras representativas de los suelos, para luego poder llevar a cabo ensayos de laboratorio. De esta manera se pueden obtener los parámetros requeridos del suelo para el diseño de excavaciones y cimentaciones.

1.6.3. Californian Bearing Ratio (CBR) y sus Aplicaciones

El autor (Bowles, 1980) menciona que el ensayo de relación de soporte de California fue desarrollado en 1929 por la División de Carreteras de California para medir la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas con la finalidad de clasificar su capacidad para ser usado como base la construcción de vías. El procedimiento de ensayo está normado por la ASTM D1883 y se lo obtiene como la relación de la carga unitaria para lograr una profundidad determinada de penetración del pistón dentro de la muestra de ensayo.

La principal aplicación del ensayo CBR es con fines de diseño de pavimento para la construcción de vías. Se publican diseños de pavimento en los cuales se entra a una tabla con el número de CBR y se lee directamente el espesor de la subrasante y/o espesor del

pavimento, basado en las cargas de la llanta esperada. Otras veces el valor de CBR se convierte a módulo de subrasante antes de entrar a las tablas de diseño de pavimento.

1.6.4. Penetración de cono dinámico (DCP) y sus Aplicaciones

El ensayo de penetración de cono dinámico (DCP) fue desarrollado por Scala (1956), sus parámetros han sido utilizados para evaluar la resistencia del suelo y estimar un valor de CBR de campo en condiciones no controladas. La normativa que estandariza el ensayo DCP es ASTM D6951, utilizando un instrumento para medir la penetración del suelo con un martillo de 8 kilogramos (Demera, Romero, & Hernández, 2019).

Mediante las correlaciones establecidas en la normativa ASTM, se obtiene el CBR y se direcciona con posibles propósitos de aplicación al diseño de pavimentos. Por otra parte, una aplicación adicional es la determinación de densidad en campo mediante la estimación del peso unitario del suelo, controlando la compactación de este en etapas constructivas (Angelone, Tosticarelli, & Martínez, 1994).

1.6.5. Correlaciones entre CBR y DCP

A partir de la aplicación del ensayo de Cono de Penetración Dinámico (DCP) en campo, diferentes investigaciones han desarrollado correlaciones con parámetros geotécnicos esenciales, como la capacidad de carga obtenida mediante el ensayo SPT, el peso unitario del suelo y el valor de soporte de California (CBR). Estas relaciones han sido validadas a través de diversos métodos de investigación, aprovechando la rapidez de ejecución y el bajo costo operativo que caracterizan al DCP.

En varios estudios, la correlación entre el CBR obtenido en laboratorio y el DCP medido en campo ha incorporado propiedades mecánicas adicionales como el contenido de humedad, la densidad seca máxima, el índice de plasticidad y la granulometría, buscando aumentar la precisión en la estimación de la capacidad portante. De esta forma, se han propuesto múltiples fórmulas empíricas para distintos tipos de suelos, las cuales se

resumen en la Tabla 3, clasificando el material y presentando la expresión correspondiente según cada investigador.

En la **Tabla 3** se recogen un conjunto de correlaciones propuestas por diferentes investigadores para conectar el índice de Capacidad Soportante de California (CBR) con los resultados del ensayo de penetración dinámica (DCP) dependiendo del tipo de suelo y de la textura del estudio. Se han recogido fórmulas propuestas para suelos granulares, cohesivos, bases de agregados y suelos de granulometrías finas, así como aquellos casos que no definen el tipo de suelo.

Entre las aportaciones más relevantes se encuentran las correlaciones propuestas por autores como Kleyn (1975) y Webster et al. (1992) que plantean relaciones de unos tipos potenciales, junto con las que sugieren otras (Livneh, 1987; Harison, 1987; Gabr et al. 2000, Sahoo Reddy, 2009) que recurren a modelos logarítmicos, y que corrigen el efecto del CBR cuando se relaciona con la resistencia de penetración. Todas estas correlaciones constituyen un referente para la estimación indirecta de la capacidad de soporte de los suelos, optimizando así la evaluación de las condiciones geotécnicas en campo.

Tabla 3

Correlaciones existentes entre CBR y DCP

N	Tipo de suelo	Investigador	Correlación
1	Desconocido	Kleyn 1975	$CBR=410 \times DCP^{-1.27}$
2	Granular y cohesivo	Livneh 1987	$\log(CBR)=2.56-1.16\log(DCP)$
3	Granular y cohesivo	Harison 1987	$\log(CBR)=2.55-1.14\log(DCP)$
4	Desconocido	Webster et al. 1992	$CBR=292 \times DCP^{-1.12}$
5	Granular y cohesivo	Livneh et al. 1473	$\log(CBR)=2.45-1.12\log(DCP)$
6	Base de agregados	Gabr et al. 2000	$\log(CBR)=1.4-0.55\log(DCP)$
7	Granular fino	Sahoo and Reddy 2009	$\log(CBR)=2.758-1.274\log(DCP)$

Si bien las correlaciones expuestas constituyen una referencia técnica de gran utilidad, su validez no siempre es universal, ya que las características geotécnicas de un suelo dependen de factores como su origen geológico, las condiciones climáticas y el grado de compactación, los cuales varían significativamente entre regiones. Aplicar directamente

fórmulas obtenidas en contextos diferentes al local puede derivar en estimaciones imprecisas del CBR, lo que comprometería el diseño y el desempeño de las estructuras de pavimento.

En este sentido, se justifica la necesidad de desarrollar correlaciones específicas para los suelos de la provincia de Napo, considerando su composición, estructura y condiciones ambientales propias. Este análisis permitirá no solo validar y ajustar ecuaciones previamente publicadas, sino también proponer nuevas relaciones empíricas adaptadas a la realidad geotécnica local. De esta manera, se busca optimizar el proceso de caracterización de la subrasante, reduciendo costos y tiempos sin sacrificar la confiabilidad técnica de los resultados.

1.6.6. Análisis estadístico

Con el fin de establecer correlaciones confiables entre los valores obtenidos en los ensayos de California Bearing Ratio (CBR) y Cono de Penetración Dinámico (DCP), se aplicará un análisis estadístico que incluye regresión lineal múltiple y la prueba t de Student. Este procedimiento permitirá cuantificar el grado de asociación entre las variables, evaluar su significancia y validar las funciones predictivas obtenidas.

1.6.6.1. Regresión Lineal

La regresión lineal es una técnica estadística que permite modelar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. Su objetivo es estimar el valor medio de la variable dependiente a partir de los valores observados de las variables independientes. En una relación lineal, el cambio en la variable dependiente es proporcional al cambio en la variable independiente, manteniendo una proporción constante en todo el rango de valores (Bacchini, Vázquez, Bianco & García, 2018).

En este estudio, la variable dependiente corresponde al valor de CBR, mientras que las variables independientes incluyen los resultados del ensayo DCP, la densidad seca

máxima y la humedad óptima. La ecuación general de la regresión lineal múltiple se expresa como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad \text{Ecuación 1}$$

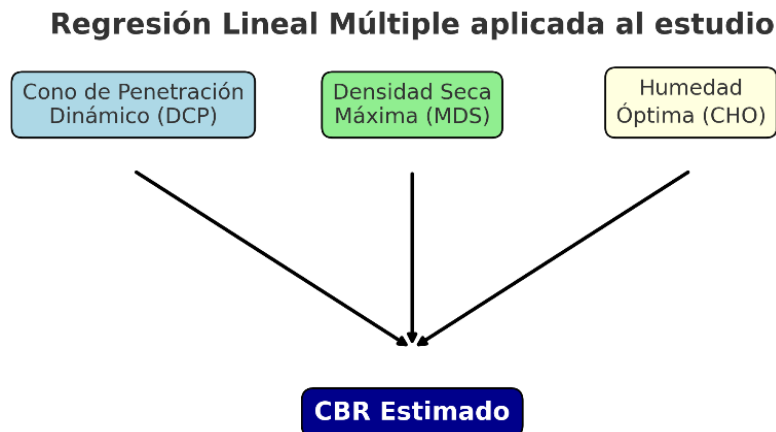
donde:

- Y = Variable dependiente (CBR)
- X_1, X_2, \dots, X_n = Variables independientes
- β_0 = Intercepto
- β_i = Coeficientes de regresión
- ε = Error aleatorio

El esquema conceptual de la regresión lineal múltiple se presenta en la **Figura 6**, la cual ha sido definida en el presente estudio y cuyo objetivo es estimar el valor del CBR a partir de tres variables independientes que tenían gran importancia para este estudio. Teniendo en cuenta los resultados del ensayo de Cono de Penetración Dinámico (DCP), la Densidad Seca Máxima (MDS) y el Contenido de Humedad Óptima (CHO). Este tipo de modelo estadístico que emplea la técnica de la regresión lineal múltiple permite considerar a la vez los efectos de los parámetros mecánicos de compactación del suelo, generando una ecuación predictiva que permite estimar adecuadamente la capacidad de soporte sin tener que recurrir exclusivamente a ensayos de laboratorio.

Figura 6

Esquema conceptual de la regresión lineal múltiple utilizada en el estudio



1.6.6.2. Distribución t Student

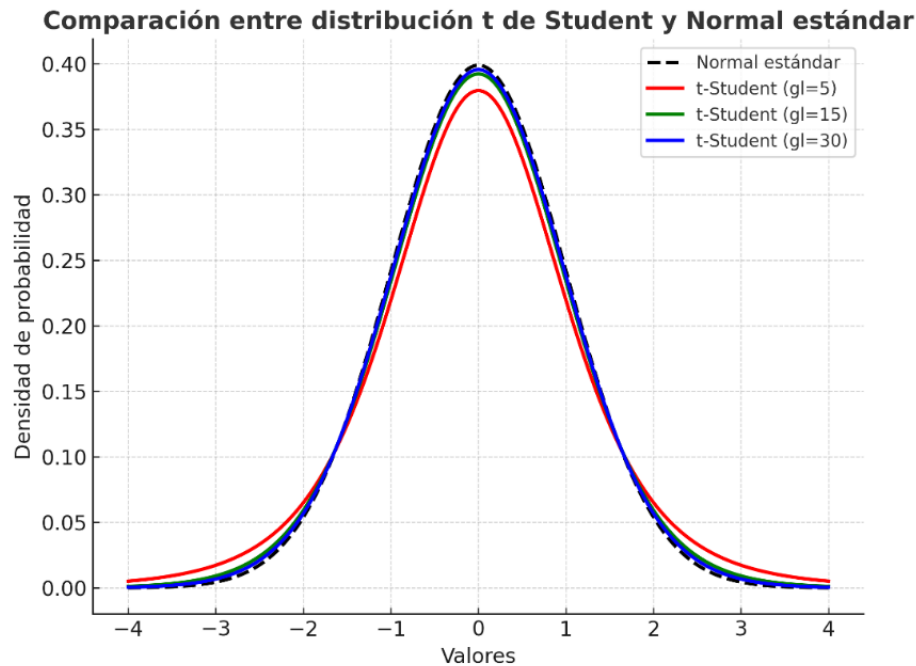
La distribución t de Student es una distribución de probabilidad continua y simétrica, similar a la distribución Normal, pero con colas más anchas, lo que implica una mayor probabilidad de valores extremos en muestras pequeñas. A medida que los grados de libertad aumentan, la distribución t se aproxima a la normal estándar $N(0,1)$. Para más de 30 grados de libertad, las diferencias son mínimas y en la práctica puede emplearse la aproximación normal (Bacchini et al., 2018). La Ilustración 2 presenta las curvas de la distribución t para 5, 15 y 30 grados de libertad, comparadas con la normal estándar $N(0,1)$. A medida que aumentan los grados de libertad, la forma de la distribución t converge hacia la de la normal, reduciendo la diferencia en las colas y la curtosis.

La **Figura 7** muestra la comparación entre la distribución t de Student y la distribución Normal estándar, considerando diferentes grados de libertad (gl). Se observa que, con un número reducido de grados de libertad ($gl=5$), la distribución t presenta colas más anchas y una menor altura en el pico central en comparación con la Normal, lo que refleja una mayor variabilidad y dispersión de los datos. A medida que los grados de libertad aumentan ($gl=15$ y $gl=30$), la forma de la t de Student se aproxima progresivamente a la Normal estándar, evidenciando que, para valores altos de gl , ambas distribuciones son prácticamente indistinguibles. Este análisis resulta fundamental para determinar la

pertinencia del uso de una u otra distribución en pruebas estadísticas de hipótesis y estimaciones de parámetros.

Figura 7

Comparación entre distribución t Student y Normal.



1.6.6.3. Prueba de Hipótesis

La prueba de hipótesis es un procedimiento que permite evaluar si una afirmación sobre un parámetro poblacional es coherente con los datos obtenidos de una muestra. En este estudio, se empleará la prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales, con el objetivo de determinar si existe una diferencia significativa entre los valores de CBR obtenidos en laboratorio y los estimados por la ecuación de regresión lineal múltiple. Las hipótesis se formulan de la siguiente manera:

- Hipótesis nula (H_0): No existe diferencia significativa entre el CBR obtenido en laboratorio y el CBR estimado por el modelo de regresión lineal múltiple.
- Hipótesis alternativa (H_1): Existe una diferencia significativa entre el CBR obtenido en laboratorio y el CBR estimado por el modelo de regresión lineal múltiple.

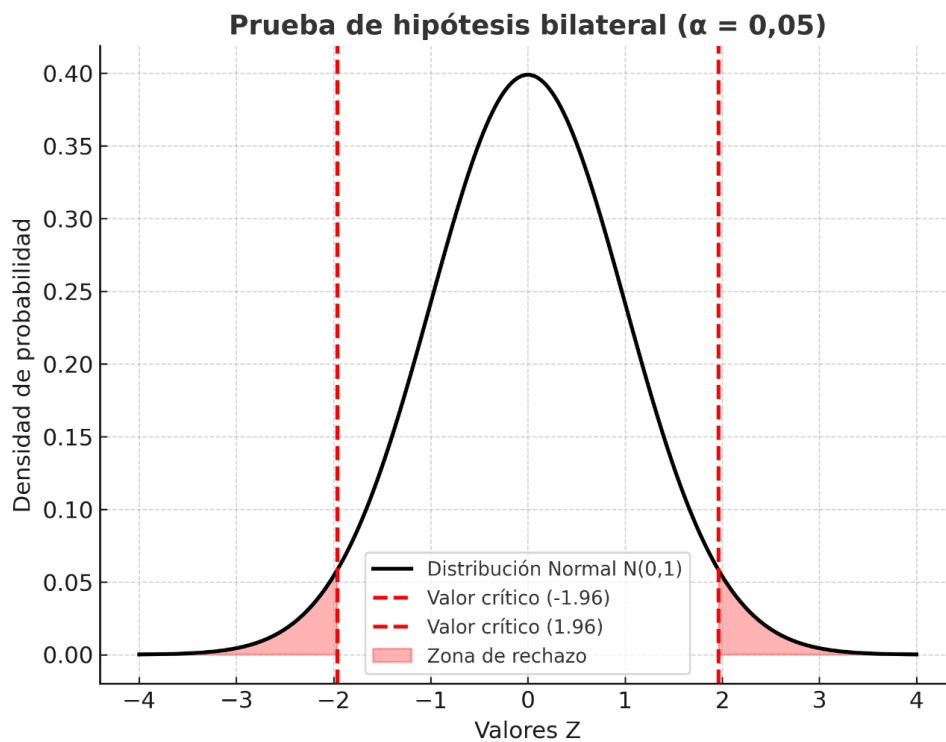
Regla de decisión (nivel de significancia $\alpha=0,05$):

- Si el valor $p \leq 0,05$ se rechaza H_0 y se acepta H_1 .
- Si el valor $p > 0,05$ no se rechaza H_0 .

En la **Figura 8** se representa la distribución normal estándar $N(0,1)$ con zonas de rechazo en los extremos, delimitadas por los valores críticos $Z=\pm 1,96$. Si el estadístico de prueba cae dentro de estas zonas o el valor p es menor o igual a $0,05$, se concluye que la diferencia observada es estadísticamente significativa.

Figura 8

Esquema de prueba de hipótesis bilateral con $\alpha=0,05$



Capítulo 2

2. Metodología

El presente capítulo describe de manera detallada la metodología adoptada para el desarrollo de la investigación, la cual se estructuró en un plan de trabajo que integra actividades de campo, de laboratorio y de procesamiento de datos.

En la etapa de campo se ejecutaron ensayos in situ de Cono de Arena y Penetración de Cono Dinámico (DCP), destinados a la obtención de parámetros relacionados con la resistencia y compacidad del suelo. Posteriormente, en laboratorio, se realizaron ensayos de granulometría, Proctor modificado, CBR, límites de Atterberg, humedad natural y clasificación unificada de suelos (SUCS), con el fin de caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del material.

La fase de procesamiento comprendió la sistematización, depuración y análisis estadístico de los datos obtenidos, incorporando la formulación de propuestas de correlación entre el CBR y los resultados de los distintos ensayos, mediante funciones de tipo lineal, exponencial, logarítmica y polinómica. Este enfoque metodológico permitió integrar la información de campo y laboratorio en un marco analítico coherente para el cumplimiento de los objetivos planteados.

2.1. Plan de Trabajo

El plan de trabajo contempló un programa de levantamiento de información en campo y laboratorio, estructurado en función de un muestreo aleatorio definido a partir de recorridos preliminares. Durante estas inspecciones se identificaron sitios representativos, no edificados y distribuidos estratégicamente, con el objetivo de abarcar la mayor extensión posible dentro de la zona de estudio, delimitada por el perímetro urbano del casco central del cantón Archidona. Esta estrategia permitió seleccionar puntos de muestreo que aseguran la representatividad espacial y geotécnica del área evaluada.

2.2. Ensayos de Campo

Las actividades de campo se ejecutaron siguiendo el Plan de Trabajo y las especificaciones normativas correspondientes. Se llevaron a cabo:

- Ensayos de Penetración de Cono Dinámico (DCP), conforme a la norma ASTM D6951, para la evaluación indirecta de la resistencia del suelo y estimación de parámetros correlacionados con la capacidad de soporte.
- Ensayos de Cono de Arena, siguiendo la norma ASTM D1556, para la determinación de la densidad in situ en los puntos previamente definidos.

La localización geográfica de cada sitio de ensayo se determinó en el sistema de referencia WGS 84 – Zona 18 Sur, tal como se detalla en la Tabla 5. En cada punto se efectuó la excavación de calicatas con el fin de obtener muestras representativas, destinadas a la ejecución de ensayos de laboratorio complementarios (granulometría, límites de Atterberg, humedad natural, Proctor modificado, CBR y clasificación SUCS). Esta combinación de técnicas permitió integrar resultados de campo y laboratorio para una caracterización integral de los suelos presentes en el área de estudio.

2.2.1. Ensayo de Cono de Arena

Este ensayo sirve para determinar la densidad in situ bajo la normativa ASTM D1556. Se utiliza un aparato de Densidad de Cono de Arena, una báscula, equipo de secado, equipo misceláneo y por último arena que cumpla con la condición $Cu < 1$, tamaño máx. $< N^{\circ} 10$, y $< 3\%$ pasa $N^{\circ} 60$. En primer lugar, después de seleccionar la ubicación se debe nivelar el terreno y asentar la placa base sobre el terreno nivelado.

Se cava un hoyo a través del orificio central de la placa base, se limpia la placa para luego invertirla y asentarla el embudo de cono de arena en el orificio de la placa. Se procede a abrir la válvula hasta llenar el hoyo y se calcula la masa de la arena usada mediante la masa de la arena restante que se encuentra en el aparato. A continuación, se

deberá registrar la masa del material húmedo que se obtuvo del hoyo de prueba. Para calcular la densidad húmeda y seca se deberá partir de las siguientes fórmulas:

$$V = \frac{M_1 - M_2}{\rho_1} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$M_4 = \frac{100M_3}{\omega + 100} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

V = Volumen de la excavacion del ensayo, [cm³].

M_1 = Masa de la arena que se utilizó para llenar la excavacion. [g]

M_2 = Masa de la arena utilizada para llenar el conoy la placa metalica. [g]

ρ_1 = Densidad de la arena [g/cm³].

ω = Contenido de agua del material extraido del hoyo, [%].

M_3 = Masa húmeda del material del hoyo de prueba, [g].

M_4 = Masa seca del material del orificio de prueba, [g].

La **Figura 9** presenta el conjunto de materiales usado para realizar el ensayo de Cono de Arena, el cual permite determinar la densidad in situ de los suelos compactados. El equipo lo conforma un frasco provisto de válvula y embudo metálico que permite la dosificación controlada de la arena calibrada almacenada en un recipiente de plástico. Se añade además una balanza digital para el registro del valor de las masas, una cinta métrica para las mediciones lineales y un cuchillo para la elaboración de la superficie de ensayo. Este ensayo es característico para la determinación de la calidad de la compactación en campo, permitiendo asegurar que se cumplen las especificaciones técnicas necesarias para la estabilidad y resistencia de la estructura.

Figura 9

Set para ensayo de Cono de Arena.



Nota. Geatec

2.2.2. Ensayo de Penetración de Cono Dinámico

Este método implica la disposición vertical de un cono con punta cónica sobre el área de interés, al cual se le aplican sucesivos golpes mediante un martillo de masa conocida (8 kg). La penetración acumulativa se registra después de cada impacto, permitiendo un análisis detallado de la resistencia del suelo y la evaluación de su capacidad a diversas profundidades. Este ensayo destaca por su celeridad, eficacia y versatilidad, siendo adaptable a distintos tipos de suelos. La normativa ASTM D6951 es comúnmente reconocida como un marco normativo relevante para la ejecución del ensayo DCP.

La **Figura 10** ilustra la realización del ensayo de Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) en el campo, método que permite evaluar la resistencia del suelo de forma rápida. El operario, dotado de los correspondientes elementos de protección personal, hace uso de la varilla con cono y del martillo de caída controlada, encontrándose registrado el empuje por golpe. Esta información permite calcular los distintos parámetros, como el CBR, que son requeridos para el diseño y control de las obras de carreteras y cimentaciones.

Figura 10*Ensayo DCP en campo**Nota. Geatec*

2.3. Ensayos de Laboratorio

En el laboratorio se llevaron a cabo los ensayos geotécnicos conforme a las especificaciones de la American Society for Testing and Materials (ASTM), con el objetivo de obtener los parámetros físicos y mecánicos necesarios para la caracterización del suelo. Los procedimientos incluyeron:

- Ensayo Proctor Modificado (ASTM D1557) para la determinación de la densidad máxima seca (MDS) y el contenido óptimo de humedad (CHO).
- Ensayo de Límites de Atterberg (ASTM D4318) para establecer el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP).
- Ensayo de Relación de Soporte de California – CBR (ASTM D1883) para evaluar la capacidad de soporte del suelo en condiciones controladas de compactación y humedad.

- Determinación del contenido de humedad (ASTM D2216) para cuantificar el porcentaje de agua presente en la muestra en su estado natural.

La aplicación sistemática de estos ensayos permitió obtener datos consistentes y comparables, fundamentales para el análisis y correlación con los resultados de campo.

2.3.1. Granulometría (ASTM D6913)

Este proceso se realiza por medio de tamices de diferentes tamaños para así poder separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que permita conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta al peso total. Los tamices tendrán mallas de diferentes aberturas.

2.3.2. Proctor modificado (ASTM D1557)

Sirve para recrear medios de compactación potentes y enérgicos. Para este ensayo se usa un molde cilíndrico de 2320 cm³ de capacidad y una masa de 4535 kg que caerá desde una altura de 457 mm. La muestra previamente se ha desecado y tamizado, para luego ser humedecida con distintos valores de humedad. Para la compactación se usan 5 capas en las cuales se aplican 25 golpes por cada capa, todas deben tener aproximadamente la misma altura. Una vez compactada la muestra se debe enrasar el molde para medir la densidad y la humedad a partir de una muestra que debe ser tomada del centro del molde. El proceso se repetirá hasta tener 5 o 6 puntos que definan una curva que relacione la densidad seca con la humedad, para lo cual se deberán usar distintos grados de humedad.

La **Figura 11** muestra el set para la ejecución del ensayo determinado con el ensayo Proctor Modificado, que permite establecer la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca máxima de un suelo bajo un nivel de compactación determinado. El set contiene moldes cilíndricos de diferentes tamaños, una guía y un pistón de compactación, tapas y adaptadores, y los accesorios requeridos para la ejecución del ensayo, permitiendo

la obtención de parámetros fundamentales en el control y diseño de obras de ingeniería civil.

Figura 11

Set para ensayo Proctor Modificado



Nota. Geatec

2.3.3. Límites de Atterberg (ASTM D4318)

En función del contenido de humedad un suelo de grano fino puede pasar de un estado de consistencia a otro, los límites que definen cada estado: semisólido, plástico, semilíquido o viscoso, son conocidos como Límites de Atterberg.

- **Límite plástico (ASTM D4318)**

Es el límite entre los estados semisólido y plástico. Este ensayo es bastante artesanal y sencillo. Primero, deberá pasar por el tamiz N°40 para después, con la palma de la mano, sobre una superficie lisa de unos 3 mm de diámetro y 25 mm de longitud, formar pequeños cilindros a partir de la muestra. Cuando estos se cuarteen en trozos de 6 mm aproximadamente significa que habrán alcanzado la humedad del límite plástico.

- **Límite líquido (ASTM D4318)**

Es el límite entre los estados plástico y semilíquido. Se realiza por medio del método conocido como cuchara de Casagrande, y lleva este nombre ya que consiste en medir la

humedad de un suelo en un surco (el surco se realiza con un acanalador estandarizado) tras dejar caer el instrumento que lleva ese nombre. La cuchara Casagrande se dejará caer 25 veces desde una altura de 1 cm. La muestra pesará aproximadamente 100 gr y deberá estar tamizada por el tamiz n°40 de la serie ASTM y mezclada con agua destilada.

El set que ha permitido realizar el ensayo de Límite Líquido se expone en la **Figura 12**. Este ensayo tiene como objetivo determinar el grado de plasticidad y la plasticidad de un suelo. El set de ensayo incluye el aparato de Casagrande con su correspondiente copa de latón, espátulas y recipientes metálicos para elaborar y manipular la muestra, y permite identificar el contenido de humedad en el que el suelo pasa del estado plástico al líquido, dato necesario en la clasificación y comportamiento geotécnico de los suelos.

Figura 12

Set ensayo Límite líquido



Nota. Geatec

- **Índice de plasticidad (ASTM D4318)**

El índice de plasticidad (IP) expresa el intervalo de humedad en el que el suelo presenta consistencia plástica, es decir, la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IP = LL - LP$$

Ecuación 4

Donde:

IP: Índice de Plasticidad

LL: Límite Líquido

LP: Límite Plástico

2.3.4. Relación de Soporte de California CBR (ASTM D1883)

El ensayo California Bearing Ratio (CBR), o Relación de Soporte de California, es una prueba estándar en ingeniería civil que evalúa la capacidad de soporte de un suelo subyacente. El procedimiento implica compactar una muestra representativa del suelo en un molde estándar y aplicar cargas estáticas en incrementos graduales mediante un pistón. La deformación resultante del suelo se mide y se relaciona con la carga aplicada.

El índice CBR se calcula como la relación porcentual entre la carga requerida para producir una cierta deformación y la carga estándar aplicada a una muestra de referencia. La normativa ASTM D1883 proporciona las directrices detalladas para la realización del ensayo CBR, estableciendo los requisitos para la preparación de las muestras, el procedimiento de compactación, la aplicación de cargas y la medición precisa de la deformación.

La **Figura 13** nos enseña el equipo que se utilizó para realizar el ensayo CBR de los suelos, cuyo nombre completo es California Bearing Ratio, el cual tiene como objetivo esta metodología de ensayo la de evaluar la resistencia de un suelo frente a la penetración, en condiciones controladas de humedad y compactación, entre otros factores, el ensayo CBR es un ensayo significativo para el diseño de pavimentos, permite calcular la capacidad de soporte del suelo y determinar el espesor de las capas estructurales del pavimento. Este equipo se compone de un marco que permite una carga, un molde cilíndrico de la muestra y un sistema para medir la penetración, así como la carga que se aplica.

Figura 13
Ensayo CBR



Nota. Geatec

2.3.5. Contenido de Humedad (ASTM D2216)

Durante el ensayo de Cono de Arena, deberá tomarse una muestra que servirá para calcular el contenido de humedad. La muestra será llevada al laboratorio y será pesada para luego ser secada, una vez seca, se volverá a pesar para determinar la diferencia entre la muestra humedad y seca. Esa diferencia representa la humedad de la muestra.

La **Figura 14** describe un horno de laboratorio. Un horno de laboratorio que sirve para el secado de muestras de suelo y de materiales de construcción. Este equipo se utiliza para poder eliminar la humedad que contienen los soportes mediante calor, es decir, garantiza que la determinación del contenido de humedad o de cualquier otro ensayo sea adecuada. Consta de bandejas internas, que permiten el adecuado posicionamiento de las muestras; también dispone de un sistema de control de temperatura, con lo que se puede garantizar que el proceso de secado se desenvuelva en condiciones adecuadas.

Figura 14*Horno de laboratorio**Nota. Geatec*

2.4. Procesamiento de Datos y Análisis de Resultados

Los datos obtenidos en campo y laboratorio fueron organizados, depurados y procesados para su posterior análisis estadístico, con el fin de identificar tendencias, patrones de comportamiento y parámetros de interés que permitan validar la calidad y coherencia de la información. A partir de estos resultados, se estableció la clasificación de los suelos presentes en la zona de estudio, considerando tanto las características físicas como mecánicas determinadas experimentalmente.

Para evaluar la relación entre el Índice de Soporte California (CBR) y los parámetros obtenidos en los ensayos complementarios, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Este indicador estadístico permitió cuantificar la fuerza y dirección de la asociación lineal entre las variables analizadas, facilitando la interpretación de la dependencia existente. El cálculo del coeficiente se realizó siguiendo los procedimientos convencionales, obteniéndose valores que sirvieron como base para seleccionar y ajustar las funciones de correlación propuestas.

2.4.1. Propuestas de Correlación

El análisis de correlaciones en esta investigación se orientó a establecer relaciones cuantitativas entre la Relación de Soporte de California (CBR) y parámetros derivados de

ensayos complementarios, incluyendo la Penetración de Cono Dinámico (DCP), el Proctor Modificado (ASTM D1557), los Límites de Atterberg (ASTM D4318) y el Contenido de Humedad (ASTM D2216). Para ello, se consideraron distintos modelos matemáticos lineal, exponencial, logarítmico y polinómico, evaluando su desempeño a través del coeficiente de determinación (R^2) y pruebas de significancia estadística. El procesamiento se llevó a cabo en el software Infostat, obteniéndose ecuaciones y representaciones gráficas específicas para cada clasificación de suelo presente en la zona de estudio.

La interpretación del coeficiente de correlación de Pearson (r) se realizó considerando tanto la magnitud como el signo del valor obtenido. Un coeficiente positivo implica que ambas variables evolucionan en el mismo sentido, mientras que uno negativo indica una relación inversa. Para clasificar el grado de correlación, se adoptó una escala que distingue seis categorías: perfecta, excelente, aceptable, regular, mínima y nula, tanto para relaciones positivas como negativas. Este criterio permite definir, con base estadística, la solidez de cada modelo propuesto y su aplicabilidad como herramienta predictiva.

En este contexto, correlaciones con $|r| \geq 0,8$ son consideradas de alta confiabilidad para la formulación de modelos empíricos que estimen el CBR a partir de parámetros indirectos, mientras que valores intermedios ($0,6 \leq |r| < 0,8$) indican una relación moderada que, si bien puede ser útil, requiere mayor precaución en su aplicación. Por su parte, correlaciones con $|r| < 0,3$ se interpretan como estadísticamente débiles o inexistentes, lo que limita su valor para fines de predicción. Esta metodología asegura que las ecuaciones propuestas se sustenten en relaciones consistentes, comparables con estudios previos y adaptadas a las condiciones geotécnicas específicas del área analizada.

La **Tabla 4** define la categorización de la correlación a partir de los valores del coeficiente r diferenciada en correlaciones positivas y correlaciones negativas. De este modo, se evalúa que la correlación es perfecta cuando el coeficiente r tenga un valor de 1 o -1, mientras que es considerada excelente si está aproximadamente extendida a tal valor abonando para los intervalos $0,9 < r < 1$ o $-1 < r < -0,9$. La correlación aceptable queda enmarcada entre 0,8 y 0,9 respecto al sentido positivo, o entre -0,9 y -0,8 respecto al

sentido negativo. La correlación regular se sitúa en los intervalos 0,6 y 0,8 en los casos positivos y -0,8 y -0,6 en los casos negativos. La correlación mínima tiene lugar en los intervalos $0,3 < r < 0,6$ o $-0,6 < r < -0,3$, mientras que con valores entre 0 y 0,3 o -0,3 y 0, la correlación mínima está ausente.

Tabla 4

Clasificación de correlación según valor r

Correlación	Positiva	Negativa
Perfecto	$r = 1$	$r = -1$
Excelente	$0,9 < r < 1$	$-1 < r < -0,9$
Aceptable	$0,8 < r < 0,9$	$-0,9 < r < -0,8$
Regular	$0,6 < r < 0,8$	$0,8 < r < -0,6$
Mínima	$0,3 < r < 0,6$	$-0,6 < r < -0,3$
No hay correlación	$0 < r < 0,3$	$-0,3 < r < 0$

Capítulo 3

3.1. Resultados

Este capítulo presenta de forma estructurada los resultados obtenidos en la investigación, junto con el análisis de las correlaciones establecidas entre las variables estudiadas. Se examina la relación entre el Índice de Soporte California (CBR) y el Ensayo de Penetración de Cono Dinámico (DCP), evaluando el grado de ajuste estadístico y la coherencia de dichas correlaciones para su aplicación en la estimación indirecta de la capacidad portante de los suelos. Paralelamente, se analizan las correlaciones del CBR con parámetros geotécnicos derivados de los ensayos de laboratorio, incluyendo peso específico seco máximo, contenido óptimo de humedad, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, contenido de humedad natural, porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 (fracción fina) y porcentaje de partículas retenidas en el tamiz N°4 (fracción gruesa).

La interpretación de los resultados se apoya en el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación (R^2), lo que permite cuantificar la intensidad y la dirección de las relaciones observadas. Se busca identificar patrones estadísticamente significativos que permitan establecer ecuaciones predictivas, con un nivel de confiabilidad adecuado para su aplicación en estudios de diseño y evaluación geotécnica. Estos modelos se contrastan con rangos de correlación reportados en la literatura técnica, garantizando la coherencia y comparabilidad de los hallazgos.

El análisis desarrollado en este capítulo no solo ofrece una caracterización cuantitativa de los suelos de la zona de estudio, sino que también proporciona herramientas prácticas para la ingeniería aplicada. La identificación de variables que inciden en la capacidad de soporte del suelo abre la posibilidad de optimizar campañas de investigación y reducir la necesidad de ensayos extensivos en futuros proyectos. Asimismo, los resultados constituyen una base para el desarrollo de metodologías predictivas adaptadas a las condiciones geotécnicas locales, fomentando la eficiencia y la sostenibilidad en el diseño y construcción de infraestructura.

3.1.1. Ubicación y muestreo

El plan de trabajo consistió en definir las zonas en las que se toman las muestras, lo cual se hizo en base a la distribución geográfica de la ciudad. Los puntos escogidos son aquellos que pasan por la zona media del cantón, y así puedan ser representativos del suelo.

En la **Tabla 5** se identifican las coordenadas de los puntos de los muestreos y ensayos en campo de tal manera que se cubren 8 de 10 barrios pertenecientes al sitio de estudio dentro del límite urbano de Archidona. El **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra de manera gráfica la distribución del muestreo para la presente investigación. Los barrios escogidos para llevar a cabo los ensayos de campo y laboratorio fueron: Las Maravillas, San Agustín, 13 de Abril, El Progreso, Central, Antonio Cabri, Piedra Grande y Andalucía.

Tabla 5

Ubicación de los puntos de muestreo

DATUM (WGS 84 ZONA 18 Sur)			
Barrio	Identificación	Norte (m)	Este (m)
Las Maravillas	AL 1	9897311	187723
	AL 2	9898302	187540
	AL 3	9898000	187239
San Agustín	AL 4	9898502	186582
13 de Abril	AL 5	9898672	187164
	AL 6	9898858	187312
El Progreso	AL 7	9899049	187399
	AL 8	9899204	187441
Central	AL 9	9899427	187529
Antonio Cabri	AL 10	9900306	187726
	AL 11	9899907	187447
Piedra Grande	AL 12	9899589	186851
Andalucía	AL 13	9899304	186373
	AL 14	9898926	187065

3.1.2. Resultados de ensayos de campo

Como resultado de los ensayos en campo se ejecutaron 14 calicatas para realizar ensayos de penetración por cono dinámico (DCP) y densidad en campo por cono de arena.

La **Tabla 6** muestra los resultados del ensayo de cono de arena, se obtuvo la densidad húmeda y seca en campo, así como propiedades volumétricas y gravimétricas del suelo como: relación de vacíos (e), porosidad (n) y grado de saturación (Gw).

Tabla 6

Resultados de ensayo de densidad en campo por Cono de Arena

Muestra	Ym in Situ (gr/cm³)	Yd in Situ (gr/cm³)	e%	n (%)	Gw (%)
AL 1	1,105	0,617	3,28	76,64	63,44
AL 2	1,012	0,646	3,10	75,59	48,28
AL 3	1,305	0,812	2,20	68,71	69,23
AL 4	1,153	0,709	2,72	73,10	60,28
AL 5	1,086	0,785	2,36	70,22	42,32
AL 6	0,948	0,734	2,62	72,41	29,90
AL 7	1,092	0,676	2,89	74,28	55,25
AL 8	1,140	0,848	2,12	67,90	42,61
AL 9	0,939	0,707	2,74	73,26	31,46
AL 10	1,229	0,817	2,19	68,68	58,12
AL 11	1,703	1,205	1,20	54,54	91,31
AL 12	1,966	1,675	0,59	37,25	81,42
AL 13	2,086	1,883	0,41	28,93	69,96
AL 14	1,446	1,004	1,74	63,47	75,38

Se obtuvieron densidades secas menores a 1 g/cm³ en las muestras AL1 hasta AL10 y mayores a 1 g/cm³ de AL11 hasta AL14, lo que indica suelos sueltos en el primer grupo y semicompactos en el segundo grupo. El segundo ensayo en campo que se ejecutó fue penetración por cono dinámico (DCP) el cual se resume en la Tabla 7, indicando el DN en milímetros por golpe promedio de cada uno de los sitios escogidos para el ensayo.

Los resultados de la prueba DCP (Penetrómetro Dinámico de Cono) de los diferentes tipos de muestras analizados, cuyas muestras se codifican en los códigos AL-1 a AL-14, pueden observarse en la Tabla 7 que aparece a continuación. En la segunda

columna de la tabla se muestra la penetración por golpe, DN, medida en mm, la cual, como se puede observar, varía significativamente entre las muestras ensayadas, lo que pone de manifiesto que la resistencia del suelo no es la misma en las muestras. Los valores altos de la muestra AL-8 (149,66 mm/golpe) y AL-14 (156,13 mm/golpe) indican suelos poco resistentes; en aquellas con los valores más bajos, tales como la AL-13 (15,54 mm/golpe) y AL-12 (17,36 mm/golpe), los suelos muestran una mayor resistencia. De este modo, los datos obtenidos permiten establecer una caracterización mecánica del terreno, de forma preliminar y según la facilidad de penetración.

Tabla 7

Resultados del ensayo DCP

Muestra	DN (mm/golpe)
AL 1	94,32
AL 2	76,43
AL 3	104,81
AL 4	127,14
AL 5	97,26
AL 6	71,40
AL 7	93,11
AL 8	149,66
AL 9	75,24
AL 10	25,02
AL 11	48,29
AL 12	17,36
AL 13	15,54
AL 14	156,13

3.1.3. Resultados de ensayos de laboratorio

Se recuperó muestra alterada (50 kg) para ensayos de laboratorio, tales como: límites de Atterberg, humedad natural, granulometría, proctor modificado y CBR. La **Tabla 8** resume los resultados de límites de Atterberg, humedad natural y clasificación SUCS del muestreo.

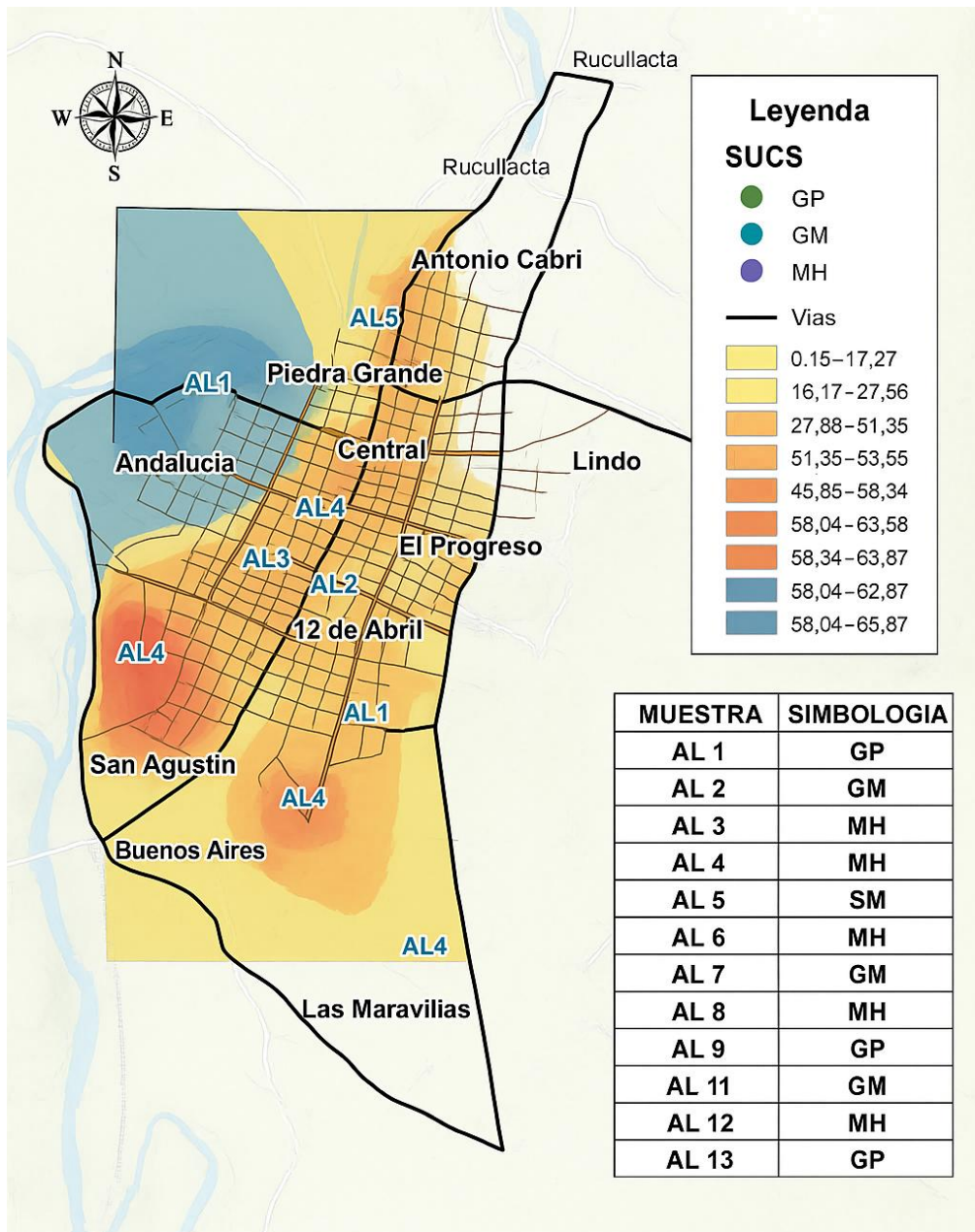
Tabla 8*Resultados de Clasificación SUCS*

Ensayos		Clasificación SUCS				
Muestra	Simbología	Descripción	Limite líquido II (%)	Limite plástico Ip (%)	Índice de plasticidad ip (%)	Humedad natural (%)
AL 1	ML	Limo de Baja Plasticidad	49,34	39,31	10,03	79,28
AL 2	ML	Limo de Baja Plasticidad	49,89	39,90	9,99	56,71
AL 3	MH	Limo de Alta Plasticidad	53,87	33,11	20,76	60,78
AL 4	MH	Limo de Alta Plasticidad	63,88	48,67	15,21	62,67
AL 5	ML	Limo de Baja Plasticidad	33,89	29,71	4,18	38,45
AL 6	ML	Limo de Baja Plasticidad	31,54	27,34	4,20	29,07
AL 7	ML	Limo de Baja Plasticidad	40,40	34,12	6,28	61,53
AL 8	SM	Arena Limosa	31,36	24,73	6,63	34,35
AL 9	ML	Limo de Baja Plasticidad	31,74	31,27	0,47	32,75
AL 10	MH	Limo de Alta Plasticidad	58,41	54,11	4,30	50,44
AL 11	MH	Limo de Alta Plasticidad	54,34	53,31	1,03	41,35
AL 12	GP	Grava Mal Graduada	NP	NP	NP	17,40
AL 13	GP	Grava Mal Graduada	NP	NP	NP	10,75
AL 14	MH	Limo de Alta Plasticidad	58,53	46,13	12,40	44,00

La Figura 16 ofrece una visión de la distribución espacial del límite líquido y de la clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) en el ámbito urbano del cantón Archidona. En el mapa aparecen los puntos de muestreo (AL-1 a AL-14), junto a su simbología, siguiendo el SUCS (ML, MH, CL, SM y SC). La gradación de colores representa la serie de valores del límite líquido, y por tanto muestra zonas que poseen características geotécnicas contrastantes.

Figura 16

Influencia del límite líquido y clasificación SUCS



Sources: Esri, HERE, Garmin, Intermap, Increment P Corp, GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAn, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Se observa que el mapa cromático se halla dentro de la distribución espacial del límite líquido en la zona objeto de estudio. Se caracteriza la presencia de limos de escasa plasticidad de las muestras AL1, AL2, AL5, AL6 y AL7 que corresponden fundamentalmente a los barrios Las Maravillas, 12 de Abril y El Progreso, concentrándose especialmente en el

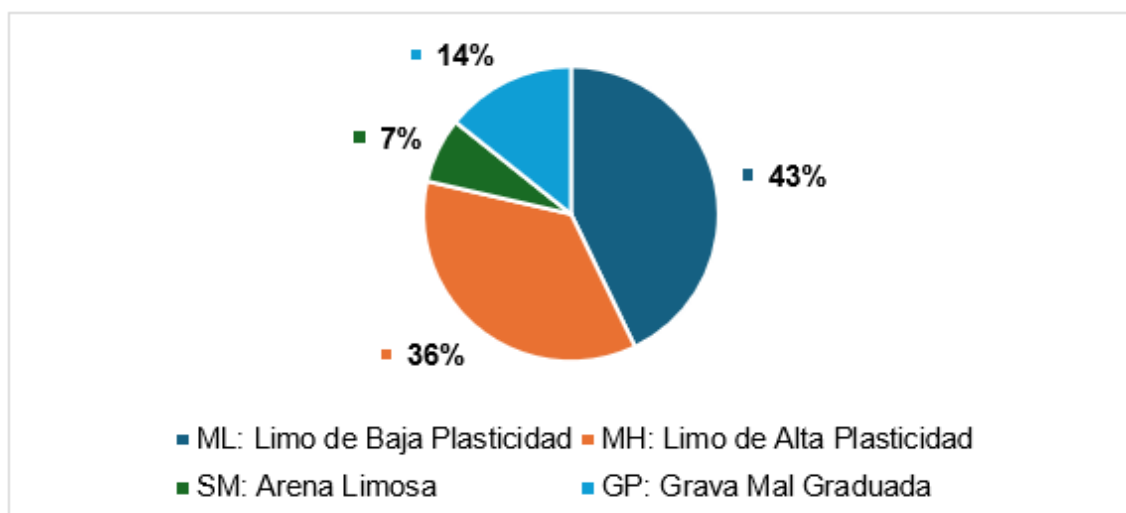
sector este de la zona estudiada. Por el contrario, se da cuenta de la existencia de limos de gran plasticidad en las muestras AL3, AL4, AL14, AL11 y AL10, pertenecientes a los barrios San Agustín, Las Maravillas, Antonio Cabri y Andalucía, los cuales se presentan en la parte oeste y norte del área en estudio.

La muestra AL8 dentro del barrio El Progreso, se presenta como clasificación de arena limosa, al ser un relleno. Las muestras AL12 y AL13 en los barrios Piedra Grande y Andalucía se clasifican como grava mal graduada como terreno natural, justificada por la cercanía al río Misahuallí en el sector noroeste. En general, la clasificación SUCS del suelo de la subrasante de las 14 muestras del sitio de estudio es 43% de limo de baja plasticidad (ML), 36% limo de alta plasticidad (MH), 14% grava mal graduada (GP) y 7% de arena limosa (SM).

La **Figura 18** muestra la interpretación porcentual de la clasificación SUCS del suelo subrasante, correspondiente a las 14 muestras recolectadas en el cantón. Se aprecia que un 43% de las muestras se corresponden con limo de baja plasticidad (ML), seguido de un 36% de limo de alta plasticidad (MH). La arena hasta una grava limosa (SM), da un 7%, y la grava mal graduada (GP) el 14% restante.

Figura 17

Clasificación SUCS del suelo subrasante de las 14 muestras dentro del cantón



El ensayo de granulometría realizado a cada una de las muestras obtenidas se presenta en la **Tabla 9** en el cual se verifica la predominancia de finos, seguida por arena y finalmente grava, con excepción de la muestra AL5, que se presenta con mayor porcentaje de arena, seguido de finos y finalmente grava.

Tabla 9

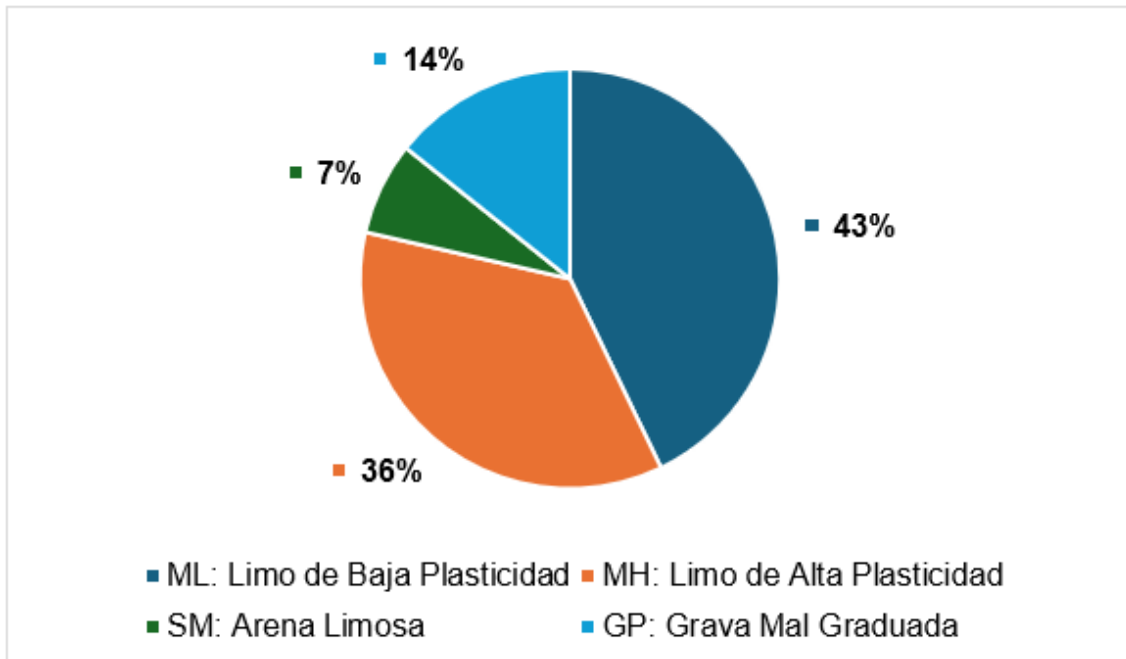
Resultados de ensayo de granulometría

Ensayos	Granulometría		
	Muestra	Grava (%G)	Arena (%S)
AL 1	0,27	6,80	92,93
AL 2	0,30	5,25	94,45
AL 3	0,62	6,78	92,60
AL 4	0,47	7,18	92,35
AL 5	21,46	47,62	30,92
AL 6	1,70	7,72	90,58
AL 7	8,14	40,14	51,72
AL 8	0,40	6,10	93,50
AL 9	0,48	7,16	92,36
AL 10	1,24	14,63	84,13
AL 11	0,99	11,80	87,21
AL 12	57,57	29,13	13,30
AL 13	63,52	32,73	3,75
AL 14	0,03	3,13	96,84

La **Figura 18** presenta como resultado el análisis del ensayo de granulometría, mostrando la distribución porcentual de los distintos tipos de suelo que se han detectado en las muestras de estudio determinadas, donde se muestra que el 43% de la población está constituida por limo de baja plasticidad (ML), el 36% corresponde a limo de alta plasticidad (MH), la arena limosa (SM) está representada por el 7%; el 14% corresponde a grava mal graduada (GP). Esta composición granulométrica resulta ser significativa, presuponiendo suelos de tipo fino, y la misma tiene implicaciones significativas en cuanto a su comportamiento mecánico, capacidad portante y respuesta a la carga estructural.

Figura 18

Resultados del ensayo de Granulometría



Previo al ensayo de CBR se realizaron ensayos de Proctor modificado para obtener la densidad seca máxima de laboratorio, así como el contenido de humedad óptimo de compactación. Se muestran los resultados en la Tabla 10, realizando una comparativa entre la densidad obtenida en campo, valores indicados en la Tabla 6, obteniendo el grado de compactación del suelo natural de las calicatas en los puntos escogidos. Se corroboró que las muestras AL1 a AL10 con densidades menores a 1 g/cm^3 presentaron porcentajes de compactación bajos menores a 80%, mientras que las muestras AL10 a AL14 con densidades en campo mayores a 1 g/cm^3 se encontraron con compactación mayor al 80%.

Los datos que aparecen en la **Tabla 10** muestran el ensayo Proctor Modificado dado en las 14 muestras de suelo, acompañando simbología SUCS, densidad seca máxima ($Y_d \text{ max}$) contenido de humedad óptimo (W_{op}) y porcentaje de compactación (G_c). Las densidades secas máximas de los tipos de suelo van de los $0,968 \text{ gr/cm}^3$ a los $2,116 \text{ gr/cm}^3$, dándose cuenta de diferencias considerables entre su clasificación: clasificaciones que llevan a que las gravas mal graduadas (GP) son las que tienen la mayor densidad seca máxima, las arenas limosas (SM) poseen la densidad seca máxima intermedia y los limos

son los que poseen la menor densidad seca máxima; el contenido de humedad máximo dan valores entre 8,20% a 56,00%, de notoria diferencia, ese amplio rango de humedad que se refleja en la tabla 10 indica la gran necesidad de agua necesaria para alcanzar la máxima compactación; la variabilidad de los porcentajes de compactación de los tipos de suelo va de 33,01% a 94,21%, permitiendo intuir la información necesaria en cuanto a la respuesta de cada tipo de suelo en relación al proceso de compactación que es la información que normalmente se recaba en el diseño y control de obras de ingeniería civil.

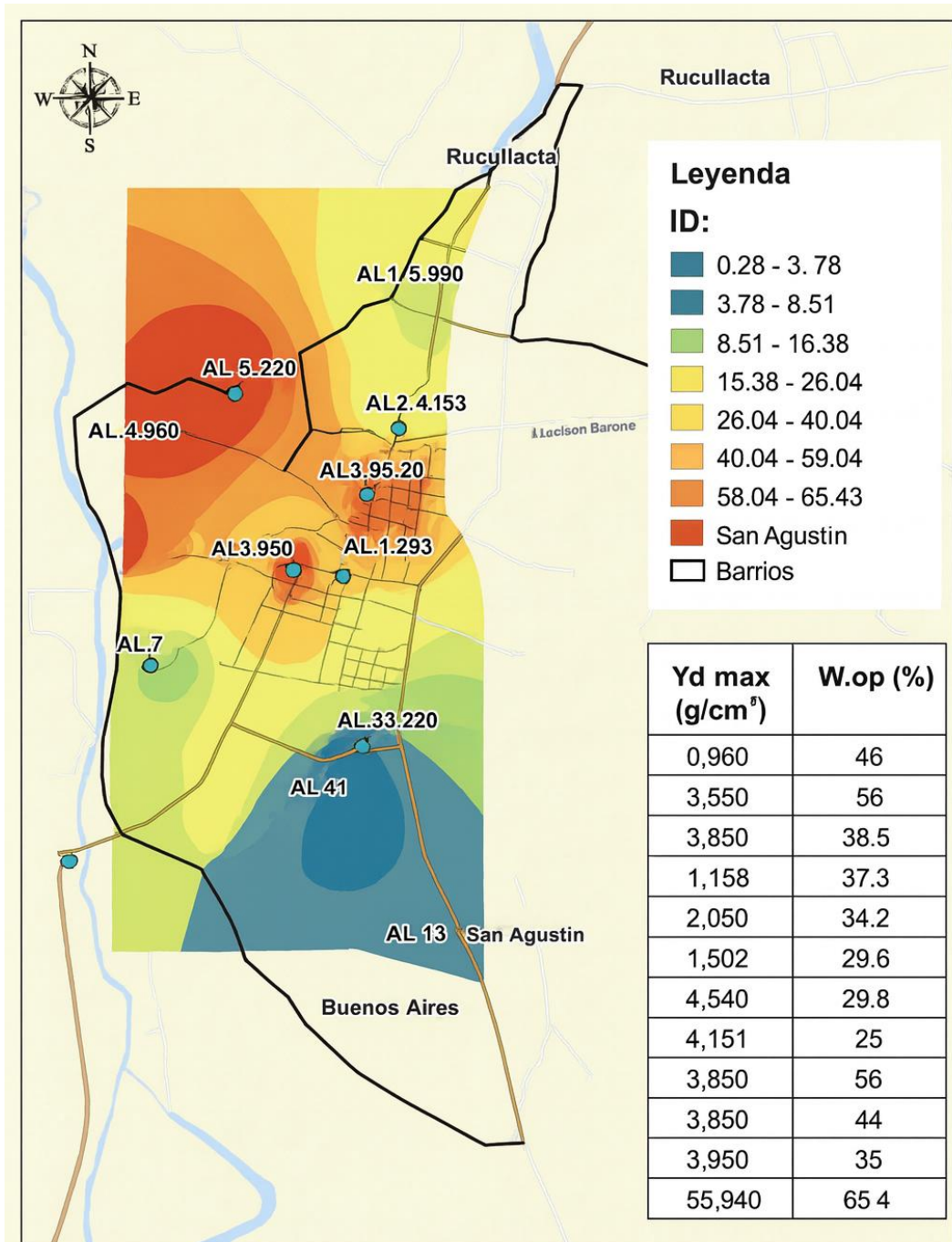
Tabla 10

Resultados del ensayo Proctor Modificado

Ensayos		Proctor modificado		
Muestra	Simbología	Yd max (g/cm ³)	W.op (%)	Gc %
AL 1	ML	1,136	46,00	54,31
AL 2	ML	0,968	56,00	66,74
AL 3	MH	1,036	44,20	78,38
AL 4	MH	1,152	37,30	61,55
AL 5	ML	1,765	12,00	44,48
AL 6	ML	1,376	24,00	53,34
AL 7	ML	2,048	8,20	33,01
AL 8	SM	1,502	19,00	56,46
AL 9	ML	1,194	38,00	59,21
AL 10	MH	1,288	33,60	63,43
AL 11	MH	1,279	34,00	94,21
AL 12	GP	2,064	10,00	81,15
AL 13	GP	2,116	9,20	88,99
AL 14	MH	1,193	38,00	84,16

La **Figura 19** representa el comportamiento del límite líquido mediante un mapa de colores en el área de investigación. Se incluye, además, la representación de los valores de densidad seca máxima correspondientes a todas las estaciones de muestreo para su contraste entre los barrios. Puede observarse, en general, que la muestra de material de relleno (AL7) y las de gravas (AL12 y AL13) alcanzan los valores más altos de densidad seca máxima en comparación con otras muestras.

Figura 19
Influencia de los resultados de Proctor Modificado



Sources; Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, Eri-Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community, and

La **Tabla 11** resume los resultados del ensayo de CBR de laboratorio para 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración. Según la normativa ASTM D1883, La relación de soporte (CBR)

reportada para el suelo es normalmente la de 2.54 mm (0.1") de penetración. Cuando la relación a 5.08 mm (0.2") de penetración resulta ser mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado similar, se usa la relación de soporte para 5.08 mm (0.2") de penetración. Por lo que los datos de CBR a ser utilizados dentro de las correlaciones respectivas serán los reportados para 0.1 pulgadas de penetración. Finalmente, se clasificó la calidad del material de la subrasante según criterios de Raúl Rodas del libro "Carreteras, Calles y Aeropistas" y se obtuvo una clasificación general como regular.

Tabla 11

Resultados del ensayo CBR en laboratorio

Ensayos		CBR		Clasificación
Muestra	Simbología	0.1"	0.2"	Calidad
AL 1	ML	3,5	2,8	Subrasante muy pobre a regular
AL 2	ML	4,2	3,6	Subrasante muy pobre a regular
AL 3	MH	2,0	1,8	Subrasante muy pobre
AL 4	MH	1,2	1,1	Subrasante muy pobre
AL 5	ML	3,1	2,6	Subrasante muy pobre a regular
AL 6	ML	4,6	4,1	Subrasante muy pobre a regular
AL 7	ML	3,6	3,2	Subrasante muy pobre a regular
AL 8	SM	1,3	1,1	Subrasante muy pobre
AL 9	ML	4,1	3,7	Subrasante muy pobre a regular
AL 10	MH	9,4	7,3	Subrasante regular
AL 11	MH	6,5	5,4	Subrasante regular
AL 12	GP	20,1	17,2	Subrasante buena
AL 13	GP	23,4	20,6	Subbase buena
AL 14	MH	1,2	1,0	Subrasante muy pobre

3.2. Análisis de resultados

Los datos utilizados para iniciar con el proceso, obtenidos en el apartado anterior, fueron necesarios para empezar con una correlación entre los resultados del ensayo CBR en comparación del DCP. En la **Figura 20** se muestran los resultados donde la variable X es DN y la variable Y es CBR, respectivamente. La línea de tendencia que ajusta su coeficiente de determinación más próximo a 1 es la función potencial. En la **Figura 20**, literal A muestra

una función potencial con un r^2 de 0.9734 y la **Figura 20** literal B presenta una función logarítmica con un r^2 de 0.8825, por lo que se utilizará la función potencial de:

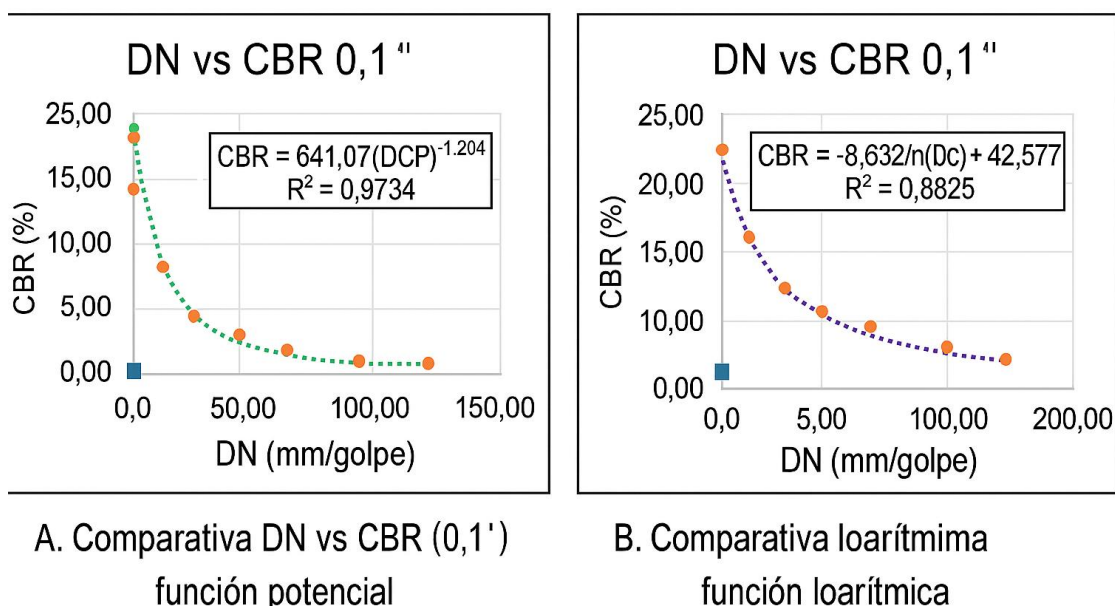
$$CBR = 641,07(DCP)^{-1,204}$$

Ecuación 5

La **Figura 20** representa la comparación de los modelos de correlación potencial u logarítmica que vinculan el número de impactos del ensayo DCPI (DN) con el índice CBR a 0,1". El modelo de función potencial (A) {con una ecuación en su forma $CBR = 641,07(DCP)^{-1,204}$; con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,9734$ muestra una buena correlación inversa entre las dos variables referidas. En este sentido, el modelo de función logarítmica (B) presenta la ecuación $CBR = -8,632 \ln(DCP) + 42,577$ y un $R^2 = 0,8825$, indicando un mejor ajuste en comparación al modelo potencial. Por último, se debe manifestar que estos resultados sugieren una mayor variedad del modelo logarítmico al describir la relación entre la resistencia del suelo y el número de impactos medido en campo.

Figura 20

Comparación de Modelos de Correlación Potencial y Logarítmica entre DN y CBR (0.1")



Investigaciones anteriores indican ecuaciones de correlaciones entre CBR y DCP descritas en la Tabla 3, las mismas que se probaron para los valores de DN obtenidos en los ensayos de DCP en campo.

La **Tabla 12** detalla una comparación llamada "comparativa" entre los valores de CBR obtenidos por la presente investigación y los resultados obtenidos mediante el uso de correlaciones empíricas utilizadas por autores como, Kleyn (1975), Livneh (1987), Harison (1987), Webster (1992), Livneh (1973), Gabr (2000), Sahoo & Reddy (2009). Dicho análisis permite la evaluación entre el método de la presente investigación realizada con las fórmulas de referencia que dan lugar a diferencias que, en algunos casos, son significativas; además, el valor de la desviación estándar desviación (σ) se muestra para cada muestra, señalándose así una medida cuantificada de la dispersión de resultados respecto del valor obtenido en la investigación presente a fin de dar cuenta de una apreciación capaz de poder ofrecer un juicio de valor en cuanto a la fiabilidad de cada correlación.

Tabla 12

Comparativa de resultados CBR de correlaciones existentes y actual investigación

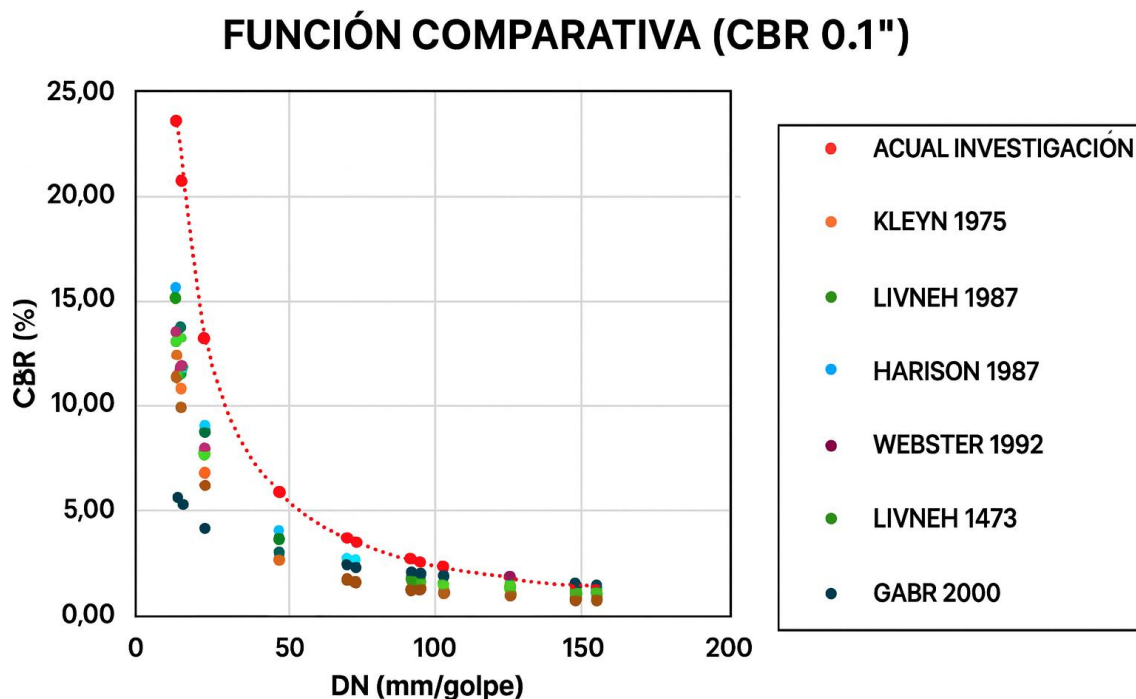
Muestra	Actual investigación	Kleyn 1975	Livneh 1987	Harison 1987	Webst er 1992	Livneh 1473	Gabr 2000	Sahoo and redy 2009	Desviación estándar (σ)
AL 1	2,7	1,27	1,86	1,99	1,79	1,73	2,06	1,15	0,48
AL 2	3,48	1,66	2,37	2,53	2,27	2,19	2,31	1,5	0,60
AL 3	2,38	1,11	1,65	1,76	1,59	1,54	1,94	1	0,44
AL 4	1,89	0,87	1,32	1,42	1,28	1,24	1,75	0,78	0,38
AL 5	2,61	1,22	1,79	1,92	1,73	1,67	2,03	1,1	0,47
AL 6	3,78	1,81	2,57	2,73	2,45	2,37	2,4	1,63	0,65
AL 7	2,75	1,29	1,89	2,02	1,82	1,76	2,08	1,16	0,49
AL 8	1,56	0,71	1,09	1,18	1,07	1,03	1,6	0,64	0,35
AL 9	3,55	1,7	2,42	2,58	2,31	2,23	2,33	1,53	0,61
AL 10	13,26	6,87	8,67	9,04	7,93	7,65	4,28	6,21	2,61
AL 11	6,03	2,98	4,04	4,27	3,8	3,67	2,98	2,69	1,06
AL 12	20,54	10,93	13,25	13,71	11,94	11,53	5,23	9,9	4,29
AL 13	23,46	12,58	15,06	15,55	13,52	13,05	5,56	11,4	4,98
AL 14	1,48	0,67	1,04	1,12	1,02	0,98	1,56	0,6	0,34

El **Figura 21** representa la función comparativa entre valores de la CBR (0.1") y del DN (mm/golpe). Debemos aclarar que los puntos de diferentes colores hacen referencia a la obtención de ensayos CBR reportados por otros autores (Kleyn 1975, Livneh 1987, Harison 1987, Webster 1992, Livneh 1473 y Gabr 2000), mientras que los puntos en color rojo corresponden a los resultados obtenidos en el presente trabajo. La línea en punto rojo representa también la correlación final obtenida en este trabajo, pudiendo compararse con lo que había resultado de las investigaciones anteriores.

Correspondería complementar esta figura con una tabla resumen en donde recoja la proposición de las diferentes ecuaciones para las diferentes propuestas de los autores, por cuanto le va a facilitar la interpretación comparativa de los resultados.

Figura 21

Comparativa de resultados CBR con correlaciones existentes



En la investigación se obtuvieron los siguientes parámetros en los ensayos de laboratorio: DCP, densidad seca máxima (Y_{dmax}), humedad óptima (W_{op}), los mismos que se servirán como variables independientes para establecer una ecuación que mediante una función lineal múltiple que tendrá como variable dependiente al CBR. Se utilizaron los

valores del ensayo Proctor, DCP y CBR; se excluyeron los parámetros de límites de Atterberg, al existir muestras no plásticas con valor 0, las mismas que alteraban la regresión y no proporcionaban valores coherentes. La ecuación 6, es el resultado de la regresión lineal múltiple, en la cual se obtuvo un coeficiente de correlación múltiple de 0,908 y un coeficiente de determinación (r^2) de 0,825.

$$CBR = -0,09DCP + 16,62Yd_{max} + 0,25Wop - 17,57 \quad \text{Ecuación 6}$$

Las **Tabla 13** y **Tabla 14** exhiben los resultados obtenidos a partir del análisis de regresión lineal múltiple para las variables en estudio. En la Tabla 13 se puede apreciar que el coeficiente de correlación múltiple es 0,908, lo que indica que existe una alta relación entre las variables independientes y la variable dependiente. A su vez, el coeficiente de determinación R^2 , que es 0,825, pone de manifiesto que el modelo es capaz de explicar el 82,5% de la variabilidad observada, y el R^2 ajustado de 0,772 también señala el buen ajuste del modelo.

El error típico fue de 3,309 y se analizaron un total de 14 observaciones. Finalmente, la **Tabla 14** muestra los coeficientes estimados para cada variable, sus errores típicos, los valores t, las respectivas probabilidades y los intervalos de confianza al 95%. De este modo, es posible determinar cuál es la magnitud y la dirección del efecto de cada predictor sobre la variable dependiente, y se destaca que las variables $Yd_{\text{máx}}$ y Wop tienen coeficientes positivos significativos, mientras que DCP es el predictor del efecto negativo en el modelo.

Tabla 13

Resultados de la regresión lineal múltiple

Estadísticas de la regresión	
Coficiente de correlación múltiple	0,908
Coficiente de determinación R^2	0,825
R^2 ajustado	0,772
Error típico	3,309
Observaciones	14

Tabla 14

Resultados de los coeficientes de función lineal múltiple

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	-17,57	18,99	-0,93	0,38	-59,88	24,74	-59,88	24,74
Yd máx	16,62	8,42	1,97	0,08	-2,14	35,38	-2,14	35,38
Wop	0,25	0,20	1,22	0,25	-0,21	0,71	-0,21	0,71
DCP	-0,09	0,02	-3,64	0,00	-0,14	-0,03	-0,14	-0,03

A continuación, en la **Tabla 15** se muestran los cálculos del CBR usando la Función Lineal Múltiple y la comparación con los resultados de CBR de laboratorio y de la función logarítmica. En la **Figura 22** se puede ver un análisis de la comparación.

Figura 22

Comparación CBR Laboratorio- funciones de correlación CBR y DCP

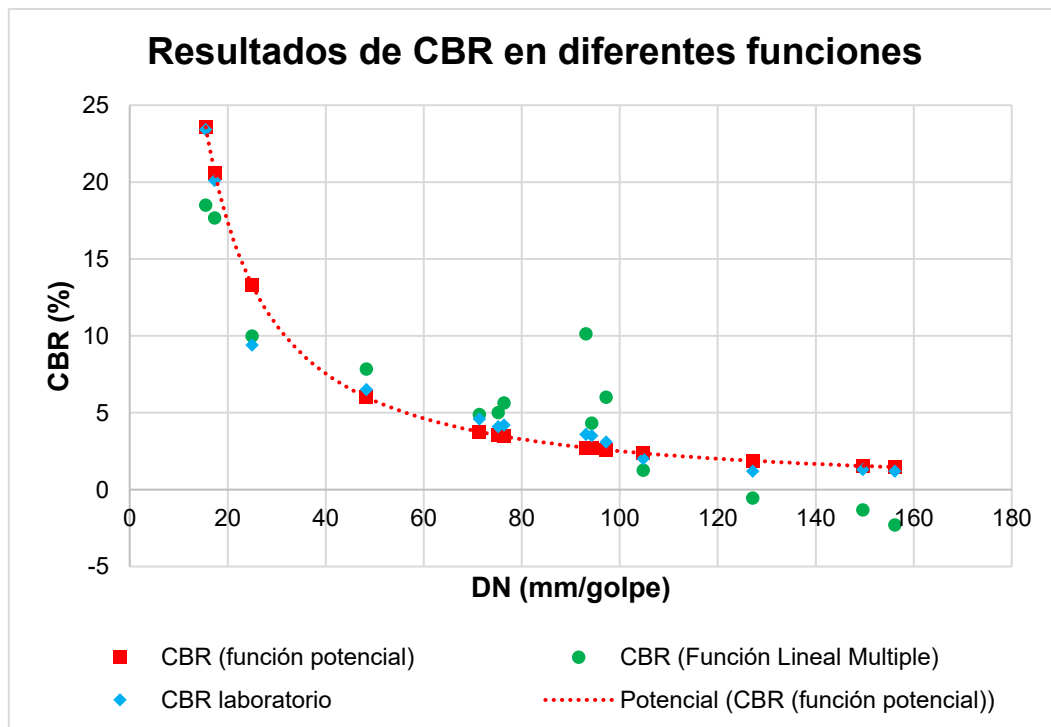


Tabla 15

Valores de comparación entre CBR Laboratorio y las funciones de correlación CBR

Muestra	CBR laboratorio	CBR (función potencial)	CBR (Función Lineal Múltiple)
AL 1	3,50	2,69	4,32
AL 2	4,20	3,46	5,64
AL 3	2,00	2,37	1,27
AL 4	1,20	1,88	-0,54
AL 5	3,10	2,59	6,01
AL 6	4,60	3,76	4,87
AL 7	3,60	2,73	10,14
AL 8	1,30	1,54	-1,33
AL 9	4,10	3,53	5,00
AL 10	9,40	13,29	9,98
AL 11	6,50	6,02	7,84
AL 12	20,10	20,63	17,67
AL 13	23,40	23,57	18,50
AL 14	1,20	1,47	-2,29

Para demostrar la validez y confiabilidad de las ecuaciones de Función Lineal Múltiple (FLM) se realiza la prueba t student para los resultados de laboratorio del ensayo CBR y función lineal múltiple obtenida, suponiendo varianzas iguales partiendo de las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula: existe una diferencia estadísticamente significativa entre el ensayo de laboratorio y la función lineal múltiple obtenida.
- Hipótesis alternativa: no existe diferencia estadísticamente significativa entre el ensayo de laboratorio y la función lineal múltiple obtenida.

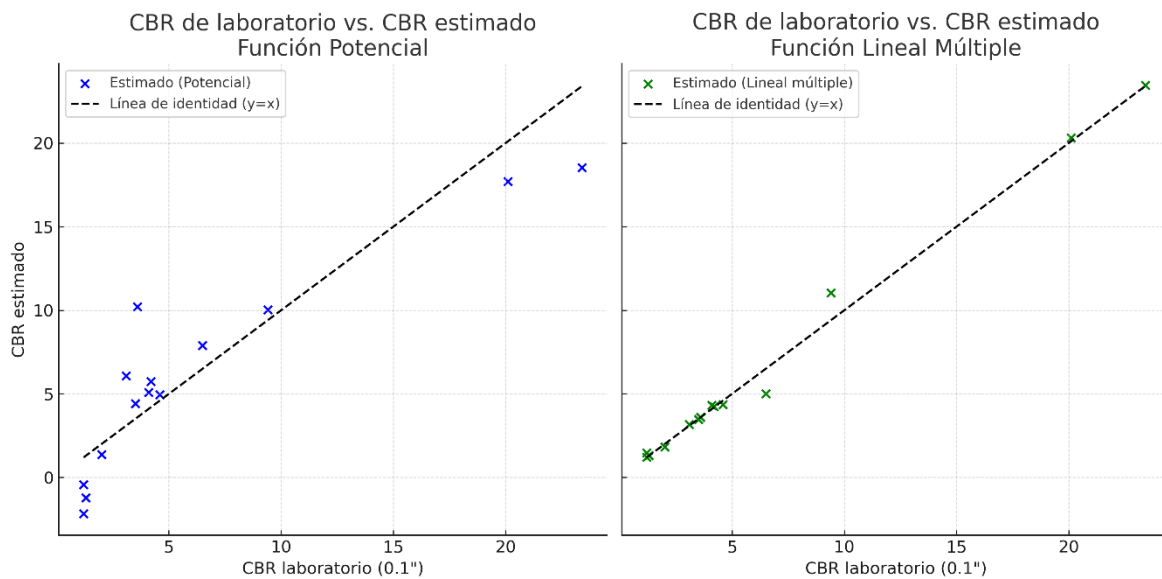
La **Tabla 16** y **Tabla 17**, muestran los resultados de las pruebas de hipótesis y análisis muestral mediante la prueba t entre:

- Los resultados de CBR de laboratorio y la función potencial de la ecuación 5.
- Los resultados de CBR de laboratorio y la ecuación de la función lineal múltiple (FLM) de la ecuación 6.

En el **Figura 23** se presenta la comparación entre los valores de CBR obtenidos en laboratorio y los estimados mediante la función potencial y la función lineal múltiple. La línea punteada negra representa la línea de identidad ($y = x$), que indica coincidencia perfecta entre el valor observado y el estimado.

Figura 23

Comparación CBR de laboratorio vs. CBR estimado



En el caso de la función potencial (panel izquierdo), los puntos se distribuyen a la línea de identidad, sin sesgos sistemáticos evidentes, lo que confirma que las estimaciones reproducen de forma adecuada la magnitud de los valores medidos. Correspondiente a la función lineal múltiple (panel derecho), también se observa un alineamiento consistente con la línea de identidad, aunque con ligeras desviaciones en valores extremos de CBR. No obstante, dichas diferencias no son estadísticamente significativas, tal como lo confirma la prueba t de Student ($p > 0,05$ en ambos modelos).

En conjunto, la proximidad de los puntos a la línea de identidad y la ausencia de desviaciones sistemáticas importantes refuerzan la validez de las correlaciones propuestas, respaldando su uso como herramientas predictivas en el rango de datos y condiciones geotécnicas evaluadas.

Los resultados de los test t para dos muestras con varianzas iguales, comparando los valores de CBR obtenidas en los laboratorios con los estimados a partir de dos modelos de predicción (la función potencial (Ec. 4) y la función lineal múltiple (Ec. 5)) se muestran en las **Tabla 16** y **Tabla 17** respectivamente. Para ambos métodos de estimación se observa que tanto los valores medios calculados a partir de las ecuaciones como la media experimental de CBR son muy similares, y que los valores probabilísticos (P-valor) son superiores a los niveles de significación definidos, con lo que se acepta la hipótesis nula.

Ello significa que no existe diferencia significativa entre los valores de CBR obtenidos de laboratorio y los estimados por los modelos propuestos, junto con el hecho de que las ecuaciones mostradas son válidas para la predicción del CBR en las condiciones evaluadas.

Tabla 16

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales entre CBR y ecuación 5

	CBR de laboratorio	Función potencial (ecuación 5)
Media	6,3	6,394
Varianza	48,117	53,475
Observaciones	14	14
Varianza agrupada	50,796	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	26	
Estadístico t	-0,0350	
P(T<=t) una cola	0,486	
Valor crítico de t (una cola)	1,706	
P(T<=t) dos colas	0,972	
Valor crítico de t (dos colas)	2,055	

El valor estadístico t dio un valor de 0,972 y el nivel de significación es 2,055 por lo cual, según la regla de decisión, se acepta la hipótesis nula, la cual indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el ensayo CBR de laboratorio y la función potencial expresada en la ecuación 5.

Tabla 17*Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales entre CBR y ecuación 6*

	CBR de laboratorio	Función lineal múltiple (ecuación 6)
Media	6,3	6,220
Varianza	48,11	40,080
Observaciones	14	14
Varianza agrupada	44,09	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	26	
Estadístico t	0,031	
P(T<=t) una cola	0,487	
Valor crítico de t (una cola)	1,705	
P(T<=t) dos colas	0,975	
Valor crítico de t (dos colas)	2,055	

Con el propósito de evaluar la validez estadística de las ecuaciones de correlación obtenidas, se aplicó la prueba t de Student para dos muestras suponiendo varianzas iguales, comparando los valores de CBR determinados en laboratorio con los estimados mediante cada modelo.

Para la Ecuación 5 (función potencial), el resultado de la prueba arrojó un valor p (dos colas) = 0,972, superior al nivel de significancia adoptado ($\alpha = 0,05$). Bajo este criterio, no se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre el CBR medido en laboratorio y el estimado por la ecuación potencial.

De manera análoga, para la Ecuación 6 (función lineal múltiple) se obtuvo un valor p (dos colas) = 0,975, también mayor a $\alpha = 0,05$, por lo que no se rechaza la hipótesis nula. Esto confirma que las diferencias entre el CBR de laboratorio y el calculado mediante la regresión lineal múltiple no son estadísticamente significativas.

En consecuencia, ambas ecuaciones presentan un ajuste estadísticamente consistente con los valores reales de CBR, dentro del rango de datos y condiciones geotécnicas evaluadas. Este resultado respalda su uso como herramientas de estimación

indirecta de la capacidad portante del suelo, especialmente en contextos donde la aplicación del ensayo CBR convencional se vea limitada por tiempo o recursos.

Capítulo 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

En torno al primer objetivo, considerado como la línea de trabajo que persigue analizar la bibliografía y los antecedentes técnicos sobre correlaciones de distintos ensayos geotécnicos, se concluyó que existía respaldo teórico suficiente que justifica el uso de métodos estadísticos para correlacionar los parámetros de ensayos de campo y de laboratorio. La revisión permitió identificar trabajos previos que evidencian la aplicabilidad de los modelos predictivos, sobre todo, entre el ensayo de penetración dinámica (DCP) y de CBR, lo que fundamentó la formulación de las ecuaciones que se fueron evaluando en este trabajo.

En cuanto al segundo objetivo, que consistía en la obtención de los valores de CBR, DCP, densidad máxima seca, contenido de humedad óptima, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, en laboratorio y en campo de los barrios Piedra Grande, Las Maravillas y Central, se procedió, en consecuencia, a la compilación de una base de datos representativa de las variedades geotécnicas existentes en el área de estudio. Los resultados obtenidos permitieron concretar la clasificación de los suelos de los barrios en función del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), y también se hicieron evidentes variaciones importantes en la resistencia y en las propiedades de compactación.

Con respecto al tercer objetivo, enfocado en la evaluación de las posibles correlaciones entre resultados de CBR y DCP y con la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo, se observó la validez de realizar la ecuación Potencial e infiriendo que la ecuación Linear Múltiple presenta coeficientes de determinación de dichos parámetros que son mayores a 0,97. Las pruebas t de Student corroboraron la no existencia de diferencias significativas entre las medidas y las estimadas, lo cual promueve la confianza en las ecuaciones para inferir la capacidad portante de la subrasante a partir de ensayos más simples y económicos.

Finalmente, en lo que concierne al cuarto objetivo, cuyas recomendaciones técnicas para aplicar las correlaciones encontradas se refieren, se concluye que las ecuaciones

desarrolladas tienen un alto potencial de ser aplicadas a estudios de Ingeniería Vial, en contextos geotécnicos y ambientales similares al de Archidona. La concordancia de los resultados encontrados, bien en comparación con otros de la anteriormente realizada, hacen evidentes que es posible una reducción de costes y tiempo en el análisis del diagnóstico, cuando se considera la validación y calibración de un mayor número de muestras y diversidad de suelos en años venideros.

4.2. Recomendaciones

Ampliar el número de muestras y una diversidad más alta de tipos de suelos en investigaciones futuras, de modo que las ecuaciones de correlación obtenidas inicien su proceso de validaciones y se adecuen a otros escenarios geotécnicos y climáticos diferentes.

Incluir, otros ensayos, como, por ejemplo, granulometría por hidrómetro, ensayos triaxiales, ensayos de corte directo, con el objetivo de buscar correlaciones al efecto de otros parámetros mecánicos que en la presente evaluación no se ha considerado, pero que pueden enriquecer los modelos predictivos.

Estudiar el comportamiento de las correlaciones medidas bajo distintas condiciones de humedad y de compactación, por ejemplo, en considerar variaciones estacionales, de forma que se pueda averiguar la aplicabilidad de estas en condiciones ante cambios climáticos o durante la vida útil de las vías.

Ejecutar proyectos viales utilizando las ecuaciones formuladas, haciendo un seguimiento a largo plazo del comportamiento de la subrasante, de forma que se pueda valorar la consistencia de las ecuaciones en condiciones operativas, y posible elaboración de factores de ajuste.

Realizar estudios en comparación de otras metodologías de predicción de CBR a partir de la inteligencia artificial o con modelos de aprendizaje, desde el objetivo de poder ver mejoras en la predicción.

Referencias

- Angelone, S., Tosticarelli, J., & Martínez, F. (1994). *Aplicación del Penetrómetro Dinámico de Cono en Obras Viales y Controles de Compactación*. Universidad Nacional de Rosario.
- Bacchini, R., Vázquez, L., Bianco, M., & García, J. (2018). *Introducción a la Probabilidad y a la Estadística*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas. Obtenido de http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/libros/Bacchini_Introduccion-a-la-probabilidad-y-a-la-estadistica-2018.pdf
- Bowles, J. (1980). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. Bogotá, Colombia : McGRAW-HILL DE MEXICO. S.A. .
- Cruz, L. E., Avedaño, G., & García, M. (2020). Proposal for geological classification and nomenclature of soils: both genetic-descriptive and compositional - mineralogical. *Boletín de Geología*(42(1)), 81-97.
- Das, B., & Sivakugan, N. (2008). *Principles of foundation engineering*. Cengage learning.
- Demera, M., Romero, C., & Hernández, E. (2019).
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Archidona. (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*. Obtenido de <https://archidona.gob.ec/phocadownload/Lotaip2022/Enero/S/PDOT%20GAD%20Archidona.pdf>
- Gobierno Municipal de Archidona, G. (2020). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Archidona.
- Holtz, R., Kovacs, W., & Sheahan, T. (1981). *An introduction to geotechnical engineering* (Vol. 733). New Jersey: Englewood Cliffs: Prentice-Hall. Obtenido de <http://www4.hcmut.edu.vn/~cnan/Soilmec/AA%20Holtz%20&%20Kovacs%20-%20An%20Introduction%20to%20Geotechnical%20Engineering.pdf>

- León Calderón, J. F. (2017). *Determinación de la correlación entre los índices DCP in situ y CBR de laboratorio*. Universidad de Cuenca.
- Lim, S.-M., Wijeyesekera, D., & Bakar, I. (2014). Correlations of soil classification and compaction parameters with soaked and unsoaked CBR of soils.
- Livneh, M. (1987). *The Use of Dynamic Cone Penetrometer in Determining the Strength of Existing Pavements and Subgrades* (Vol. 2 No. 9). Proceedings of the Ninth Southeast Asian Geotechnical Conference.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas, M. (2023). *MTOP*. Obtenido de <https://www.obraspublicas.gob.ec/se-evalua-estado-de-las-vias-de-napo/>
- Mitchell, J., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. New Jersey, USA: Third Edition. John Wiley & Sons.
- Monteiro, F., de Oliveira, F., Zittlau, O., de Aguiar, M., & de Carvalho, L. (2016). CBR Value Estimation Using Dynamic Cone Penetrometer—A Case Study of Brazil's Midwest Federal Highway. *CBR Value Estimation Using Dynamic Cone Penetrometer—A Case Study of Brazil's Midwest Federal Highway*, 4649-4656. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/306119998_CBR_value_estimation_using_dynamic_cone_penetrometer-a_case_study_of_Brazil's_midwest_federal_highway
- Norma Ecuatoriana de la Construcción, N. (2023). Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC.