

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1. Introducción

La rápida expansión del crecimiento urbano en Bolivia ha provocado incrementos de las áreas periféricas donde los caminos de tierra forman parte importante de la red vial secundaria. En ciudades intermedias como Tarija, estos caminos siguen siendo vitales para la conectividad de distritos periféricos al centro urbano. No obstante, el constante tránsito, junto a la falta de infraestructura adecuada y condiciones climáticas, deterioran estos caminos en gran medida. Esto afecta profundamente la seguridad vial, la movilidad y la calidad de vida de los usuarios. Para comprender el comportamiento de estas vías es necesario estudiar las propiedades físicas intrínsecas del suelo que conforma la capa de rodadura.

Desde la perspectiva de mecánica de suelos, la composición granulométrica, la plasticidad y el contenido de humedad natural son propiedades físicas fundamentales que controlan el comportamiento mecánico del material. Autores como Braja Das destacan que la respuesta de un suelo está directamente dictada por estas propiedades básicas. Una caracterización física precisa permite predecir el desempeño del suelo y establecer vínculos técnicos entre su naturaleza y el estado superficial observable de las vías.

En ese sentido, el Índice de Condición de Vías No Pavimentadas (URCI) representa una herramienta normativa validada por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), útil para calificar de forma sistemática el nivel de deterioro superficial de una vía en base a fallas visibles como baches, erosión o pérdida de material. Sin embargo, pese a su utilidad operativa, en la práctica boliviana no existen estudios que relacionen cuantitativamente el URCI con las propiedades físicas básicas del suelo de la capa de rodadura y su resistencia in situ evaluada mediante penetrómetro dinámico de cono (DCP).

El objetivo general de la presente investigación es determinar si existe relación significativa entre las propiedades físicas del suelo, la resistencia in situ (DCP) y el estado superficial medido con el URCI. Esta relación es la base de la hipótesis central del estudio,

que sostiene que existe una correlación estadísticamente significativa entre las propiedades físicas del suelo (granulometría y límites de Atterberg), la resistencia a la penetración (DCPI) y el valor del URCI, de modo que suelos con mayor contenido de finos, mayor índice de plasticidad y menor resistencia in situ presentarán menores valores de URCI, evidenciando un mayor grado de deterioro superficial en las vías no pavimentadas de Tarija.

1.2. Antecedentes

Chavez Claros Susan, Tarija, Bolivia (2016) Implementa el Método del Índice de Condición para Caminos No Pavimentados (URCI) en cuatro segmentos en la Provincia de Tarija, encontrando que la condición evaluada de los caminos varía de mala a muy mala. Ella concluye que la ausencia de una metodología científica para planificar eficientemente el mantenimiento conduce a decisiones ineficaces y aumenta los costos. El URCI proporciona una forma estándar de evaluar evaluaciones superficiales.

En el artículo de Mena Kuleno, Etiopía del Sur (2020), se examinan las causas y consecuencias de la deterioración en caminos no pavimentados, particularmente en países en desarrollo como Etiopía, mostrando que se ve afectado por la calidad del material, el drenaje, la geometría de la carretera, el tráfico y el clima, afirmando que gestionar eficientemente el mantenimiento de los caminos no pavimentados requiere modelos de predicción impulsados por el clima, el tráfico y la calidad del material.

En Bolivia no se han desarrollado investigaciones que relacionen directamente las propiedades físicas o mecánicas del suelo con el URCI, lo que reafirma la pertinencia de esta investigación.

1.3. Justificación

Existe un vacío de conocimiento específico respecto a cómo las propiedades mecánicas del suelo de la capa de rodadura influyen en el tipo, severidad y distribución espacial del deterioro superficial en vías no pavimentadas. Investigaciones previas en el contexto boliviano se han centrado principalmente en propiedades mecánicas complejas de evaluar (como el CBR), creando una brecha entre la teoría geotécnica y las necesidades prácticas de la gestión municipal, la cual requiere métodos rápidos, económicos y técnicamente

confiables. Este estudio surge, por tanto, de la necesidad de generar evidencia técnica local que establezca un puente directo entre la evaluación visual estandarizada (URCI), la resistencia in situ medida con penetrómetro dinámico de cono (DCP).

Los beneficios de esta investigación son técnicos, al generar correlaciones cuantitativas entre propiedades físicas del suelo, resistencia in situ (DCP) y deterioro superficial que aportan nuevo conocimiento aplicable a la geotecnia vial local; económicos, al proveer una metodología de diagnóstico integral y accesible que permite priorizar tramos críticos con base en criterios científicos y optimizar el uso de recursos municipales mediante intervenciones más efectivas; y sociales, al contribuir a mejorar la conectividad, seguridad vial y calidad de vida en zonas periurbanas mediante una gestión más eficiente y preventiva de la infraestructura vial.

Los resultados de esta investigación permitirán establecer relaciones objetivas entre los valores de penetración DCP y los patrones de deterioro superficial en vías no pavimentadas.

1.4. Situación problemática

En la ciudad de Tarija, particularmente en sus zonas periurbanas, persiste una amplia red de calles no pavimentadas que cumplen un rol fundamental en la conectividad cotidiana de la población, facilitando el acceso a servicios, centros educativos, comerciales y de transporte. Sin embargo, el mantenimiento de estas vías se realiza de manera predominantemente reactiva, basándose en evaluaciones visuales subjetivas que no consideran las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Esta aproximación empírica genera intervenciones correctivas temporales e ineficaces que suelen colapsar ante las primeras lluvias o el tránsito recurrente, iniciando un ciclo de deterioro progresivo.

De continuar con el enfoque actual de gestión, se prevé un incremento en la frecuencia e intensidad del deterioro de la red vial no pavimentada, ampliando la brecha de conectividad y accesibilidad entre el centro urbano y la periferia. El ciclo de reparaciones fallidas consumirá progresivamente más recursos municipales sin generar resultados duraderos, perpetuando el mal estado de las vías. Esta situación generará un aumento en los costos de operación del transporte público, mayores tiempos de viaje para la población

y un deterioro continuo en la calidad de vida de los habitantes, acentuando la vulnerabilidad socioeconómica de estas áreas.

El presente trabajo de investigación actuaría como un estudio piloto que proporcionaría una herramienta de diagnóstico predictivo y un conjunto de criterios técnicos basados en evidencia, que podrían ser utilizados como insumo para: (a) priorizar tramos que, por las características de su suelo, son más propensos a fallar; (b) justificar la selección de materiales y técnicas de mantenimiento más adecuados; y (c) orientar la planificación hacia una gestión vial preventiva y eficiente. De esta manera, el estudio sienta las bases técnicas necesarias para que, en una etapa posterior, la alcaldía pueda interrumpir el ciclo de deterioro con intervenciones fundamentadas.

1.4.1. Problema

¿De qué manera la resistencia a la penetración in situ evaluada mediante DCP se relacionan con el estado superficial de las vías no pavimentadas, medido mediante el Índice URCI, en los diferentes distritos de la ciudad de Tarija?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la relación entre el índice de condición de vías no pavimentadas (URCI) y la resistencia a la penetración del suelo, determinada mediante el Cono Dinámico de Penetración (DCP) en vías no pavimentadas de la ciudad de Tarija, con el fin de establecer un modelo de correlación que sirva como un precedente científico en el área de estudio.

1.5.2. Objetivos específicos

- Aplicar el método URCI para evaluar el estado superficial en cada punto seleccionado (vía no pavimentada).
- Realizar un muestreo representativo de los suelos a lo largo de las distintas calles no pavimentadas de los distritos de la ciudad de Tarija.
- Determinar mediante ensayos de laboratorio las propiedades físicas de los suelos de los 3 tramos a estudiar.

- Determinar la resistencia a la penetración del suelo de la capa de rodadura y la subrasante en los mismos tramos, mediante la ejecución del ensayo DCP y el posterior procesamiento de las curvas de penetración.
- Analizar estadísticamente la relación entre los valores del URCI y los parámetros de resistencia derivados del DCP.
- Analizar el potencial y las limitaciones del modelo de correlación URCI-DCP como herramienta de diagnóstico.

1.6. Hipótesis

El valor del Índice de Condición de Vías No Pavimentadas (URCI), influye significativamente en la resistencia a la penetración del suelo, medida a través del ensayo DCP.

1.7. Variables independientes y dependientes

Variable independiente. – URCI (Índice de Condición de Vía No Pavimentada)

Variable dependiente. – Resistencia a la penetración del suelo (DCP)

1.8. Alcance

La presente investigación se desarrollará en vías no pavimentadas de zonas periurbanas de Tarija, evaluando 30 tramos seleccionados intencionalmente. El estudio se centrará en determinar la relación entre el estado superficial (URCI) y la resistencia del suelo (DCP), sin incluir ensayos de laboratorio complejos.

El proyecto tendrá una duración de 9 semanas y sus resultados pretenden generar:

- Evidencia técnica sobre la relación DCP en contexto urbano
- Herramientas de diagnóstico accesibles para gestión municipal
- Base para futuros estudios de correlación con propiedades físicas del suelo

Los hallazgos estarán circunscritos al contexto específico de Tarija y tendrán carácter académico-diagnóstico, sirviendo como insumo para la toma de decisiones en mantenimiento vial preventivo.

1.9. Operacionalización de variables

Tabla 1.1. Operacionalización de variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Técnica / Instrumento de medición	Unidad de medida
Variable dependiente: Resistencia a la penetración del suelo (DCP)	Resistencia por capas	Tasa de penetración	Ensayo de Cono Dinámico de Penetración (DCP)	mm/golpe
		Penetración acumulada	- Cono de 60° - Martillo de 8 kg	mm
		Numero de golpes por capa	- Barras de extensión - Regla graduada	Nº de golpes
Variable independiente: Estado superficial de la vía (URCI)	Severidad de fallas superficiales	Presencia de baches, roderas, erosión, material suelto	Ficha de inspección visual basada en método ABC – URCI	Tipo y cantidad de fallas
	Ponderación por tipo de falla	Penalización por tipo de deterioro según el manual ABC	Cálculo del índice con fórmula ponderada de penalización	URCI (valor numérico: 0–100)
	Clasificación del estado funcional	Muy bueno, bueno, regular, malo, muy malo	Interpretación de resultado del índice	Categoría cualitativa

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES

DE LOS SUELOS Y

ENSAYOS

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LOS SUELOS Y ENSAYOS

2.1. El suelo

El suelo es una capa delgada de la corteza terrestre, la cual se origina de la desintegración mecánica y descomposición química de las rocas preexistentes. La descomposición química es la acción de agentes químicos que son la oxidación, carbonatación e hidratación. La desintegración mecánica es la intemperización de la roca por agentes físicos como el sol, agua, viento y glaciares; se forman suelos como las gravas, arenas, limos y ocasionalmente arcilla. (Crespo, 2010)

En Ingeniería Civil el suelo se utiliza como material de construcción en varios proyectos y en obras civiles con cimientos como material estructural, por eso es importante que el ingeniero civil realice estudios sobre las propiedades del suelo, tales como la distribución de tamaño de grano, resistencia al corte, compresión y capacidad de soporte de carga.

2.1.1. Tamaño de partículas del suelo

De acuerdo al tamaño predominante de partículas que contenga el suelo, los suelos generalmente son llamados: grava, arena, limo, arcilla o una mezcla de ellos, según como se demuestra en el cuadro siguiente.

Tabla 2.1. Sistema para identificar el tamaño de la partícula

Nombre de la organización	Tamaño de partículas en mm			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	< 0,002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	> 2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	< 0,003
American Association of Highway and Transportation (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	< 0,004
Unifield Soil Classification System (US)	75 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos (limos y arcillas	

Fuente: Bowles, Joseph E., (1981). Manual de Laboratorio de Suelos.

Diversas organizaciones que estudian aspectos relacionados con el suelo han elaborado sistemas de clasificación para identificar el tamaño de las partículas de un suelo para sus propósitos específicos. En la Tabla 2.1 se muestra algunos de los sistemas más conocidos empleados por estas organizaciones para identificar las partículas del suelo.

El sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ha sido adoptado como el estándar por la American Society for Testing and Materials (ASTM) y el reglamento que esta sociedad ha desarrollado para el análisis y estudio del suelo es aceptado a nivel internacional.

2.1.2. Contenido de humedad

Esta propiedad física del suelo es de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están regidos, por la cantidad de agua que contienen.

El contenido de humedad de un suelo es la relación del cociente del peso de del agua y el peso del suelo seco, esto se expresa en términos de porcentaje.

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

W = Contenido de humedad (%)

W_w = Peso de agua contenido en el suelo (gr)

W_s = Peso del suelo seco (gr)

2.1.3. Granulometría

La granulometría se define como la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca.

El tamaño de los granos de un suelo se refiere a los diámetros de las partículas que lo forman, cuando es indivisible bajo la acción de una fuerza moderada. Las partículas

mayores son las que se pueden mover con las manos, mientras que las más finas por ser tan pequeñas no pueden ser observadas con un microscopio.

2.1.4. Límites de consistencia

El método usado para medir los límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios de siglo a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico. Los límites de Atterberg o límites de consistencia están basados en que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Por ello un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad), es decir, la propiedad que presenta los suelos hasta cierto límite sin romperse.

a) Límite líquido (LL)

El Límite Líquido LL es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado líquido. En este estado la mezcla se comporta como un fluido viscoso y fluye bajo su propio peso. Por debajo de este contenido de humedad la mezcla se encuentra en estado plástico. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LL produce un cambio en el volumen del suelo.

b) Límite plástico (LP)

El Límite Plástico LP es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado plástico. En este estado la mezcla se deforma a cualquier forma bajo ligera presión. Por debajo de éste contenido de humedad la mezcla está en un estado semi sólido. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LP produce un cambio en el volumen del suelo.

c) Índice plástico (IP)

El Índice de plasticidad se define como la diferencia numérica entre el Limite Liquido y el Limite Plástico: $Ip = LL - LP$

Donde:

IP = Índice de plasticidad

LL = límite líquido

LP = límite plástico

Un Índice de plasticidad bajo, como por ejemplo del 5%, significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la condición de líquido, es decir resulta muy sensible a los cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto, como por ejemplo del 20%, indica que para que un suelo pase del estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua.

El Índice de plasticidad define el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico. Este valor permite determinar los parámetros de asentamiento de un suelo y su expansividad potencial.

2.1.5. Sistema de clasificación AASHTO

Este sistema de clasificación está basado en los resultados de la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el límite plástico.

La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un índice de grupo, que es un valor calculado a partir de una ecuación empírica. El comportamiento geotécnico de un suelo varía inversamente con su índice de grupo, es decir que un suelo con índice de grupo igual a cero indica que es material “bueno” para la construcción de carreteras, y un índice de grupo igual a 20 o mayor, indica un material “muy malo” para la construcción de carreteras.

Los suelos clasificados dentro los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares de los cuales 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N° 200. Los suelos que tienen más del 35% de partículas que pasan a través del tamiz N° 200 se clasifican dentro de los grupos de material fino A-4, A-5, A-6 y A-7. Estos suelos son principalmente limo y materiales de tipo arcilla.

El sistema de clasificación AASHTO presenta las siguientes características:

- Características del sistema de clasificación AASHTO (ASTM D-3282)
- Procedimiento de clasificación AASHTO

– Cálculo del índice de grupo

Este sistema clasifica los suelos en siete grupos (A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-7), según su granulometría y plasticidad. Más concretamente, en función del porcentaje que pasa por los tamices N° 200, 40 y 10, y de los Límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz N° 40. Estos siete grupos se corresponden a dos grandes categorías de suelos, suelos granulares (con no más del 35% que pasa por el tamiz N° 200) y suelos limo-arcillosos (más del 35% que pasa por el tamiz N° 200). La categoría de los suelos granulares; gravas, arenas y zahorras; está compuesta por los grupos A-1, A-2 y A-3, y su comportamiento en explanadas es, en general, de bueno a excelente, salvo los subgrupos A-2-6 y A-2-7, que se comportan como los suelos arcillosos debido a la alta plasticidad de los finos que contiene, siempre que el porcentaje de estos supere el 15%.

La categoría de los suelos limo-arcillosos está compuesta por los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, cuyo comportamiento en explanadas va de regular a malo. En esta categoría los suelos se clasifican en los distintos grupos atendiendo únicamente a su límite líquido y a su índice de plasticidad, según las zonas del siguiente gráfico de plasticidad.

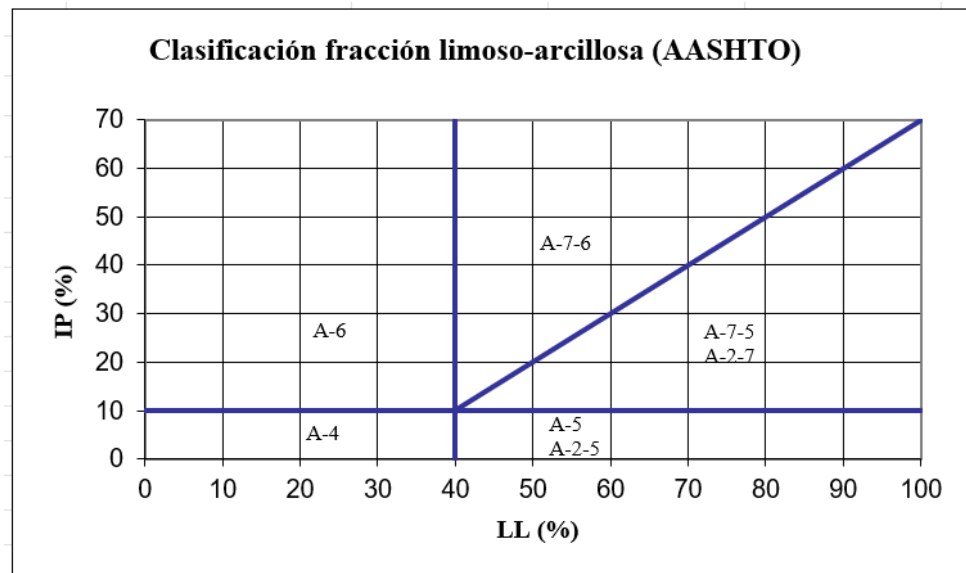
a) Suelos Finos

Los grupos incluidos en los suelos finos son los siguientes:

- A-4: El suelo típico de este grupo es un suelo limoso no plástico o moderadamente plástico, que normalmente tiene un 75% o más de material que pasa por el tamiz N° 200. También se incluyen en este grupo los suelos constituidos por mezclas de suelo fino limosos y hasta un 64% de gravas y arenas.
- A-5: El suelo típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-4, salvo que suele tener carácter diatomáceo o micáceo, y pueden ser muy compresibles, como indica su elevado límite líquido.
- A-6: El suelo típico de este grupo es un suelo arcilloso plástico, que normalmente tiene un 75% o más de material que pasa por el tamiz N° 200. También se incluyen en este grupo las mezclas de suelo fino arcilloso y hasta un 64% de gravas y arenas. Estos suelos, experimentan generalmente grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.

- A-7: El suelo típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-6, salvo que tiene las características de elevado límite líquido del grupo A-5, y puede ser elástico y estar sujeto a grandes cambios de volumen
- A-7-5: Se incluyen en este subgrupo los suelos con un índice de plasticidad moderado en relación con el límite líquido y que pueden ser altamente compresibles, además de estar sujetos a importantes cambios de volumen
- A-7-6: Se incluyen en este subgrupo los suelos con un índice de plasticidad elevado en relación con el límite líquido y que están sujetos a cambios de volumen muy importantes.

Figura 2.1. Carta de plasticidad AASHTO



Fuente: Bowles, Joseph E., (1981). Manual de Laboratorio de Suelos.

b) Índice de grupo (IG)

La clasificación realizada de esta manera se complementa con el índice de grupo, que permita caracterizar mejor cada suelo dentro de los grupos, ya que estos admiten suelos con porcentajes de finos y plasticidad muy diferentes. El índice de grupo se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$IG=(F-35) [0,2+0,005(LL-40)]+0,01(F-15) (IP-10)$$

Donde:

F = Porcentaje en peso que pasa por el tamiz N° 200 del material inferior a 75 mm, expresado en número entero.

LL = Límite líquido

IP = Índice de plasticidad

2.1.6. Sistema Unificado de Clasificación de suelos S.U.C.S

Sistema propuesto por Arthur Casagrande en 1942, y adoptado con mínimas modificaciones por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos para la construcción de aeropuertos, describe que los suelos tienen 2 tipos de partículas: gruesas y finas, las cuales se diferencian mediante el tamizado del material por el tamiz N° 200.

Los suelos que se quedan retenidos en el tamiz, se denominan suelos gruesos y los suelos finos son los que pasan el tamiz. Así si más del 50% de las partículas de un suelo quedan retenidas en el tamiz N°200 se considera un suelo grueso, y si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz, se considera un suelo fino.

Para la identificación de los suelos se designan por símbolos de grupo los cuales constan de un prefijo que son las iniciales en inglés de los tipos de suelos tales como grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos y turba; y un sufijo que indican las subdivisiones de dichos grupos.

Tabla 2.2. Prefijos y sufijos del suelo

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien gradada	W
Arena	S	Mal gradada	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	H

Fuente: Braja M. Das, 1998. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo:

Tabla 2.3. Combinaciones en función de los prefijos y sufijos del suelo

Símbolo	Características generales		
GW	Gravas (>50% en tamiz Nº4 ASTM)	Limpias (Finos <5%)	Bien gradada
GP			Mal gradada
GM		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
GC			Componente arcilloso
SW	Arenas (<50% en tamiz Nº4 ASTM)	Limpias (Finos <5%)	Bien gradada
SP			Mal gradada
SM		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
SC			Componente arcilloso
ML	Limos	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	Arcillas	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	Suelos orgánicos	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	Turba	Suelos altamente orgánicos	

Fuente: Braja M. Das, 1998. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

Como puede deducirse de la anterior Tabla, existe una clara distinción entre tres grandes grupos de suelos:

- Suelos de grano grueso (G y S).- Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido en finos, empleando el tamiz Nº 200 ASTM
- Suelos de granos fino (M y C).- Formados por suelos con al menos un 50% que pasa el tamiz Nº 200, de contenido en limos y arcillas
- Suelos orgánicos (O, Pt).- Constituidos fundamentalmente por materia orgánica. Son inservibles como terreno de cimentación

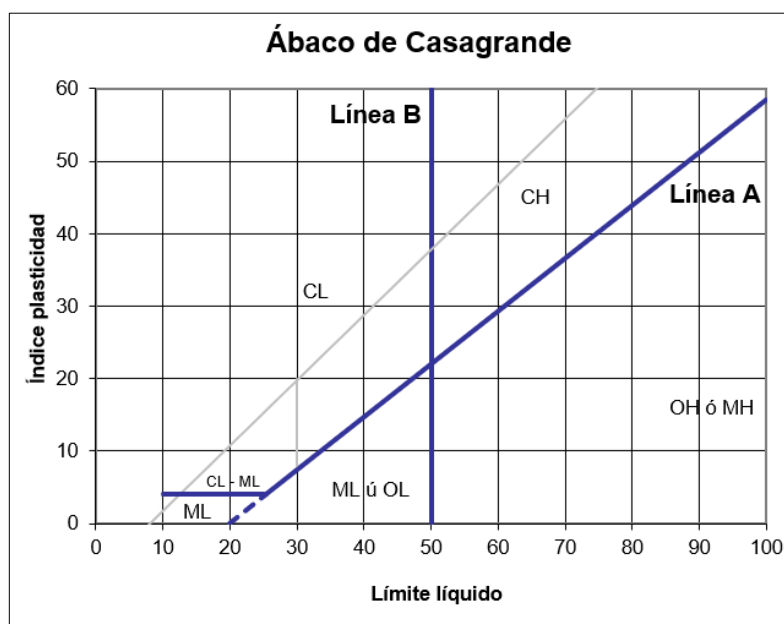
Los suelos finos, atendiendo a sus condiciones de plasticidad (directamente relacionada con las propiedades mecánicas del suelo fino) y a su contenido orgánico (también influyente en su comportamiento) se dividen en otros tres grandes grupos. El primero está constituido por los suelos no plásticos o poco plásticos llamados Limos (prefijo M, del sueco mo a mjala); el segundo incluye los suelos plásticos denominados Arcillas (prefijo C, de clay), y el tercero corresponde a los suelos orgánicos (prefijo O, de organic).

a) Clasificación de los suelos finos: La carta de plasticidad de Casagrande

Tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la carta de Casagrande de los suelos cohesivos, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites:

- Línea A: $IP = 0.73 (LL - 20)$
- Línea B: $LL = 50$

Figura 2.2. Carta de plasticidad Casagrande



Fuente: Casagrande, 1948.

2.2. Vías no pavimentadas

Una vía no pavimentada es un camino o ruta terrestre cuya superficie de rodadura no está recubierta con materiales artificiales duros y estables como asfalto o hormigón. En su lugar, está compuesta por la capa natural del terreno o materiales sueltos.

Es conocido que este tipo de vías son de las menos favorecidas con acciones de conservación y en algunos casos estas actividades no se realizan con la calidad necesaria, ni en el momento oportuno, lo que contribuye al desarrollo de deterioros y la presencia perpetua de estos.

En general, el espesor de la capa de afirmado varía entre 10 centímetros y 20 centímetros, con un valor predominante de 15 centímetros.

2.2.1. Rol en la red vial

Las vías no pavimentadas forman parte esencial de la red vial urbana y periurbana en muchas ciudades de América Latina, actuando como conexiones de bajo costo que facilitan la movilidad local. Según el Manual de diseño geométrico de la ABC (2020), estas vías, aunque no poseen estructura de pavimento, cumplen funciones de acceso para barrios en expansión, zonas agrícolas, y sectores no integrados plenamente al sistema urbano. En Tarija, estas calles suelen extenderse hacia distritos de crecimiento reciente, donde la inversión en infraestructura vial es limitada.

2.2.2. Índice de Condición de Vías No Pavimentadas (URCI)

El Índice de Condición de Vías No Pavimentadas (URCI), (sigla en inglés de *Unpaved Roads Condition Index*), es una herramienta de evaluación visual creada originalmente por el US Army Corps of Engineers como parte de sus estrategias para el mantenimiento de caminos de bajo volumen (George, 1985). Esta metodología fue posteriormente adaptada por entidades de América Latina, entre ellas la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), para facilitar el diagnóstico estructural y superficial de caminos rurales y urbanos no pavimentados (ABC, 2020). El método permite calificar el estado funcional de un tramo mediante una inspección visual sistemática de deterioros, sin necesidad de ensayos costosos ni equipos especializados, lo que lo hace especialmente adecuado para zonas con limitaciones técnicas o presupuestarias.

2.2.3. Tipos de deterioro evaluados

a) Sección transversal incorrecta (81)

Una vía no pavimentada debe tener una corona con suficiente pendiente desde el eje hacia las bermas para drenar toda el agua de la superficie de la vía. No se usa corona en las curvas pues estas son peraltadas. La sección transversal es inadecuada cuando la superficie de la carretera no es conformada o mantenida para drenar el agua hacia las cunetas.

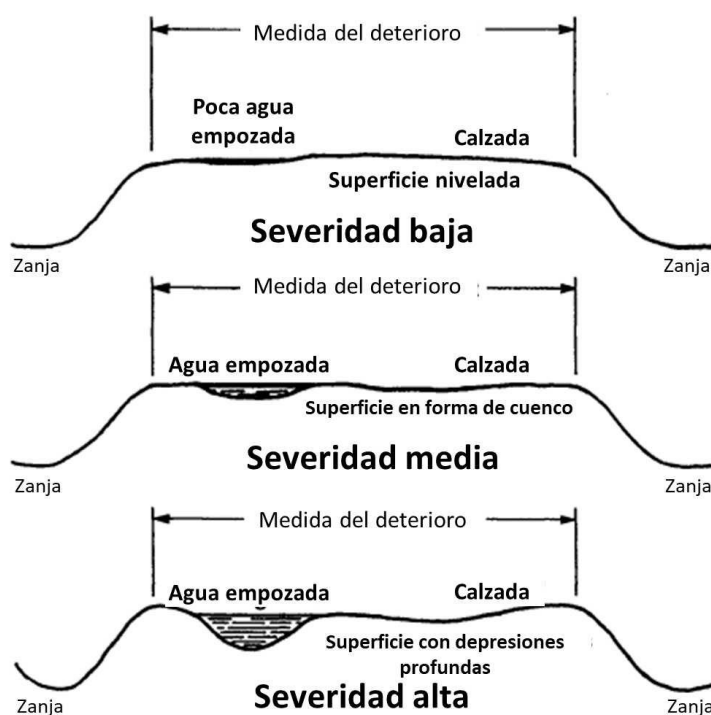
Niveles de severidad

L: Se observan pequeñas cantidades de agua empozada o hay evidencia de agua empozada en la superficie de la vía; o bien, la superficie es completamente plana sin pendientes transversales

M: Se observan cantidades moderadas de agua empozada o hay evidencia de agua empozada en la superficie de la vía; o bien, la superficie tiene forma de tazón

H: Se observan grandes cantidades de agua empozada o hay evidencia de agua empozada en la superficie de la vía; o bien, la superficie presenta depresiones profundas

Figura 2.3. Sección transversal inadecuada en vías no pavimentadas



Fuente: Unsurfaced Roads Maintenance Management Technical Manual

Medida

La sección transversal inadecuada se mide en metros por unidad de inspección. La sección transversal va desde el quiebre exterior de la berma de un lado hasta el quiebre exterior de la berma del lado opuesto. En una unidad de inspección pueden presentarse diferentes niveles de severidad.

b) Drenaje lateral inadecuado (82)

Un drenaje lateral inadecuado causa el empozamiento del agua. El drenaje se vuelve un problema cuando las cunetas y las alcantarillas no están en una condición lo suficientemente buena para conducir y transportar el agua de escorrentía debido a una configuración o a un mantenimiento inadecuados.

Niveles de severidad

L: Se observan pequeñas cantidades de agua empozada o hay evidencia de agua empozada en las cunetas; o bien, hay crecimiento excesivo de vegetación o acumulación de detritos en las cunetas

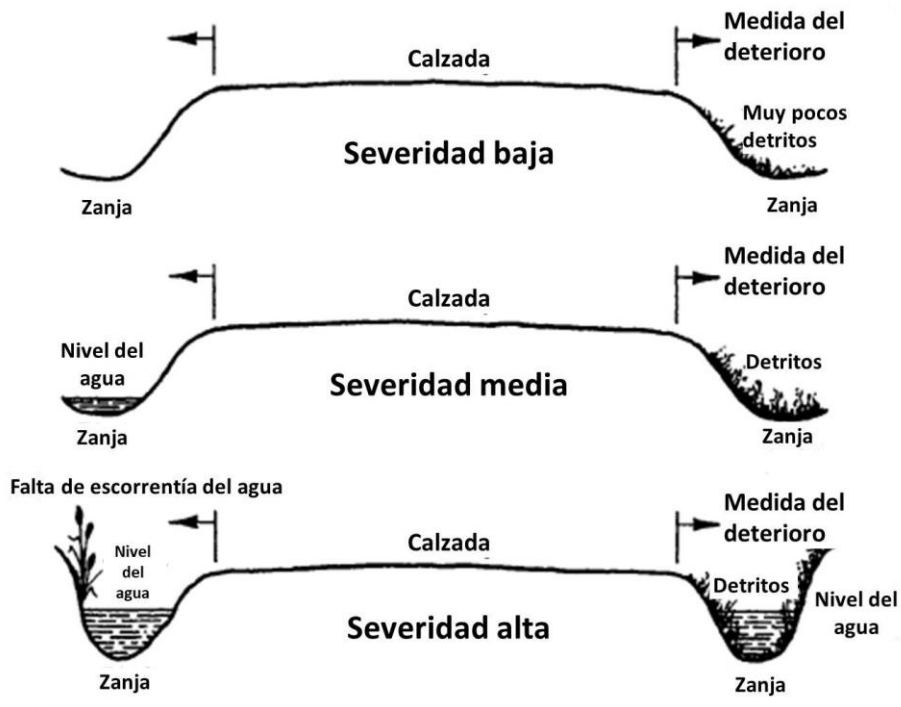
M: Se observan cantidades moderadas de agua empozada o hay evidencia de agua empozada en las cunetas; o bien, hay crecimiento excesivo de vegetación o acumulación de detritos en las cunetas; o hay erosión de las cunetas hacia la berma o la calzada

H: Se observan grandes cantidades de agua empozada o hay evidencia de agua empozada en las cunetas; o bien, el agua corre a través o sobre la vía; o hay crecimiento excesivo de vegetación o acumulación de detritos en las cunetas; o hay erosión de las cunetas hacia la berma o la calzada

Medida

Los problemas de drenaje se miden en metros por sección paralela al eje. La máxima longitud es dos veces la longitud de la unidad de inspección (dos cunetas para la longitud total de la unidad de inspección).

Figura 2.4. Drenaje lateral inadecuado en vías no pavimentadas



Fuente: Unsurfaced Roads Maintenance Management Technical Manual

c) Corrugaciones (83)

Las corrugaciones (también llamadas “tabla de lavar”) son crestas y valles (ondulaciones) estrechamente espaciadas a intervalos muy regulares. Las crestas son perpendiculares a la dirección del tránsito. Este tipo de daño suele ser causado por el tránsito y agregado suelto. Las crestas suelen formarse en colinas, en curvas, en áreas de aceleración y desaceleración, o en zonas donde la vía está debilitada o presenta huecos.

Niveles de severidad

L: Las corrugaciones tienen menos de 25.0 mm de profundidad

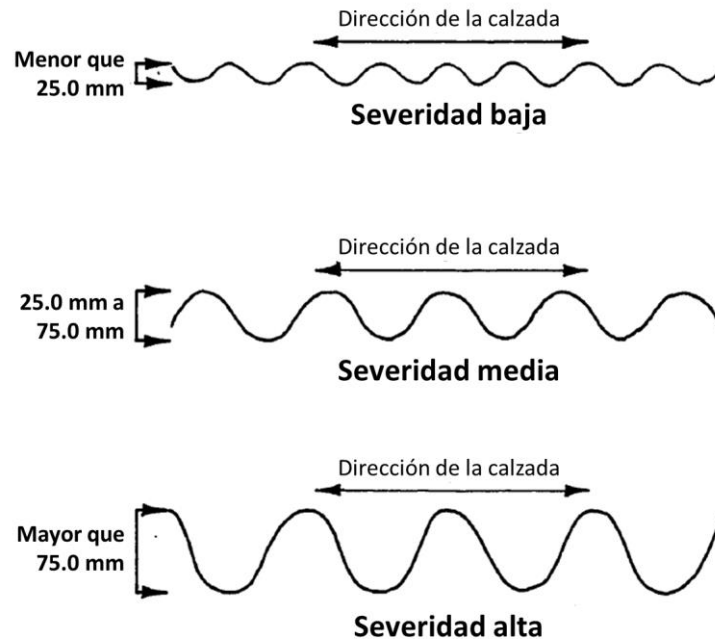
M: Las corrugaciones tienen entre 25.0 mm y 75.0 mm de profundidad

H: Las corrugaciones tienen más de 75.0 mm de profundidad

Medida

Las corrugaciones se miden en metros cuadrados de área por unidad de inspección. La cantidad no puede exceder el área total de la unidad de inspección.

Figura 2.5. Corrugaciones en vías no pavimentadas



Fuente: Unsurfaced Roads Maintenance Management Technical Manual

d) Polvo (84)

El desgaste y desgarre del tránsito sobre las vías no pavimentadas eventualmente aflojarán las partículas más grandes del suelo aglomerante. A medida que el tránsito circula, las nubes de polvo generan peligro para los vehículos agrupados en pelotón o que adelantan, y causan importantes problemas ambientales.

Niveles de severidad

L: El tránsito normal produce un polvo fino que no obstruye la visibilidad

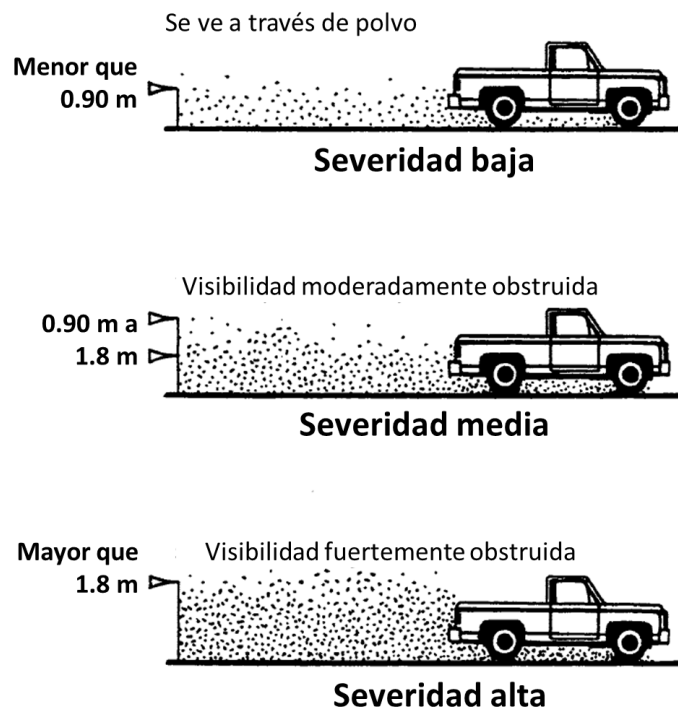
M: El tránsito normal produce una nube moderadamente espesa que puede obstruir parcialmente la visibilidad y causar que el tránsito desacelere

H: El tránsito normal produce una nube muy espesa que puede obstruir fuertemente la visibilidad y causar que el tránsito desacelere considerablemente o se detenga

Medida

Se conduce un vehículo a 40 kilómetros por hora y se observa la nube de polvo. El polvo se mide como de severidad baja, media o alta para la unidad de inspección.

Figura 2.6. Polvo en vías no pavimentadas



Fuente: Unsurfaced Roads Maintenance Management Technical Manual

e) Huecos (86)

Los huecos son depresiones en forma de cuenco en la superficie de la vía y, por lo general, tienen menos de 0.90 m de diámetro. Los huecos aparecen cuando el tránsito desprende pedazos pequeños de la superficie. Los huecos crecen más rápido cuando se acumula agua en ellos. La vía continúa desintegrándose debido al ablandamiento del material superficial o a puntos débiles en los suelos subyacentes.

Niveles de severidad

Los niveles de severidad de los huecos se basan en su diámetro y profundidad de acuerdo con la tabla 1.

Tabla 2.4. Niveles de severidad para huecos en vías no pavimentadas

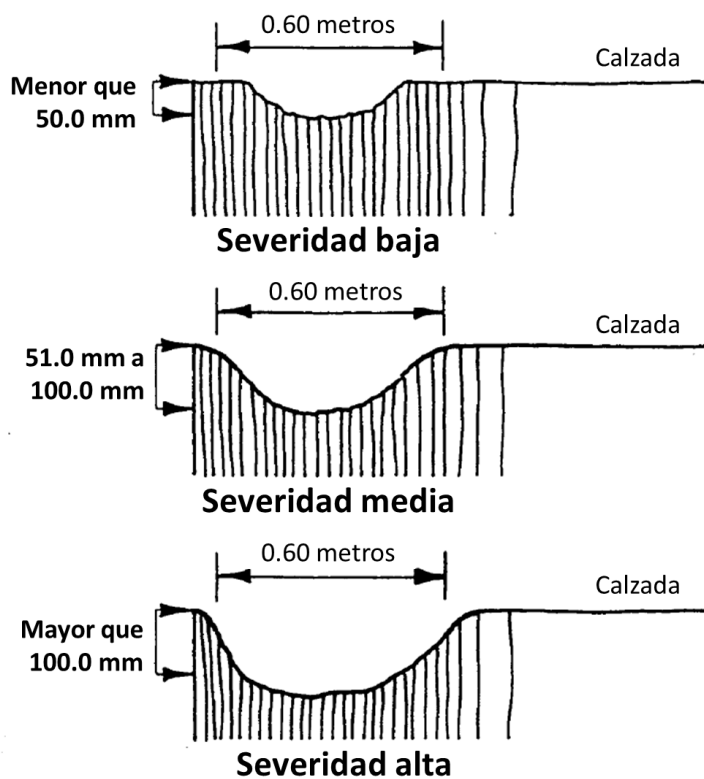
Profundidad máxima (mm)	Diámetro promedio			
	Menor que 0.30 m	0.30 a 0.60 m	0.60 a 0.90 m	Más de 0.90 m
13.0 a 50.0	L	L	M	M
51.0 a 100.0	L	M	H	H
Más de 100.0	M	H	H	H

Fuente: Unsurfaced Roads Maintenance Management Technical Manual

Medida

Los huecos se miden contando el número de ellos que son de severidad baja, media y alta en la unidad de inspección y registrándolos de forma separada.

Figura 2.7. Huecos en vías no pavimentadas



Fuente: Unsurfaced Roads Maintenance Management Technical Manual

f) Huellas (87)

Una huella es una depresión de la superficie en la trayectoria de las ruedas que es paralela al eje de la vía. Las huellas son producidas por la deformación permanente de cualquiera de las capas de la vía o la subrasante. Las huellas son el resultado de las pasadas repetidas de los vehículos, especialmente cuando la carretera está débil.

Niveles de severidad

L: Las huellas tienen menos de 25.0 mm de profundidad

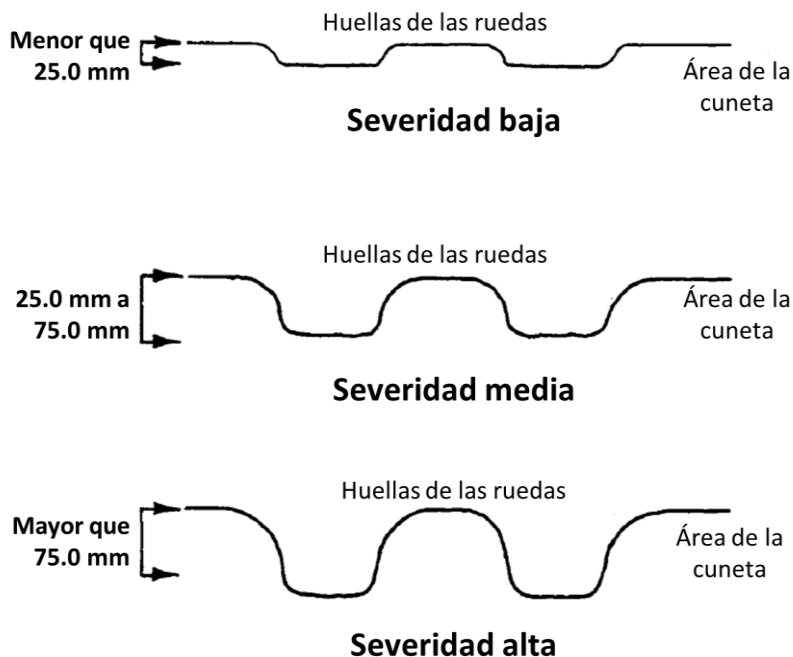
M: Las huellas tienen entre de 25.0 mm y 75.0 mm de profundidad

H: Las huellas tienen más de 75.0 mm de profundidad

Medida

Las huellas se miden en metros cuadrados de área de la unidad de inspección. Por ejemplo, una unidad de inspección puede tener 7 m² de severidad alta y 23 m² de severidad media.

Figura 2.8. Huellas en vías no pavimentadas

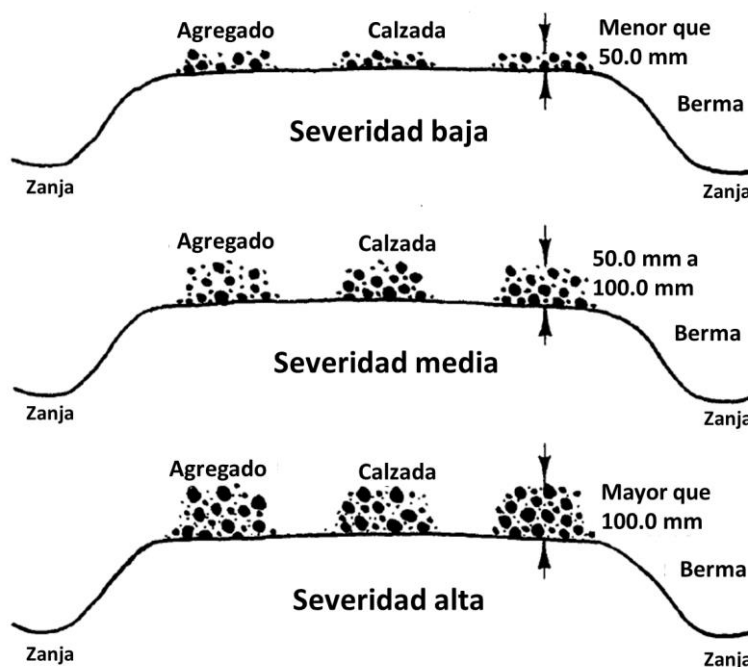


Fuente: Unsurfaced Roads Maintenance Management Technical Manual

g) Agregado suelto (88)

El desgaste y desgarre del tránsito sobre las vías no pavimentadas eventualmente aflojarán las partículas de agregado más grandes del suelo aglomerante. Esto lleva al aflojamiento de las partículas de agregado en la superficie de la vía o en la berma. El tránsito mueve las partículas de agregado suelto lejos de la trayectoria normal de las ruedas y forma cordones en el centro o a lo largo de las bermas (las áreas menos transitadas).

Figura 2.9. Agregado suelto en vías no pavimentadas



Fuente: Unsurfaced Roads Maintenance Management Technical Manual

Niveles de severidad

L: Se observa agregado suelto en la superficie de la vía, o un cordón de agregado (< 50.0 mm de espesor) en la berma o en las áreas menos transitadas

M: Se observa un cordón moderado de agregado (50.0 mm a 100.0 mm de espesor) en la berma o en las áreas menos transitadas. Usualmente, se encuentra una gran cantidad de partículas finas de suelo en la superficie de la calzada

H: Se observa un gran cordón de agregado (más de 100.0 mm de espesor) en la berma o en las áreas menos transitadas

Medida

El agregado suelto se mide en metros lineales y paralelo al eje de la unidad de inspección. Cada cordón se mide por separado. Por ejemplo, si una unidad de inspección de 30 metros de largo tiene tres cordones de agregado suelto de severidad media – uno en cada lado y el otro en el centro de la vía – el reporte será de 90 metros de agregado suelto de severidad media.

2.2.4. Cómo se calcula

El camino a evaluar, es dividido en tramos, los cuales son divididos a su vez en secciones. Cada sección es nuevamente dividida en unidades de muestreo. Para carreteras no pavimentadas, el área de la unidad de muestreo debe ser de 230 m².

Las unidades de muestra se pueden inspeccionar de dos maneras: de forma rápida en vehículos y de forma detallada, a pie, realizando mediciones. Las mediciones en este trabajo se efectuaron a pie.

Las mediciones de los deterioros se utilizan para calcular el URCI, basado en los valores de deducción. Un valor de deducción es un número de 0 a 100, donde 100 significa que la falla no tiene impacto en el estado de la carretera y 0 significa que la carretera ha fallado por completo.

URCI	0-10	10-25	25-40	40-55	55-70	70-85	85-100
Calificación	Fallado	Muy pobre	Pobre	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente

El cálculo del URCI para una unidad de muestra es realizado en cuatro pasos:

Paso 1: Se calcula la densidad de cada tipo de falla (excepto para la falla polvo), de acuerdo con la siguiente formulación:

$$Densidad = \frac{\text{Metrado de falla}}{\text{Area de unidad de muestra}} \times 100\%$$

Paso 2: Empleando la curva de valores deductivos, encontrar el valor deductivo para cada tipo de falla y nivel de severidad.

Paso 3: Determinar el valor deductivo total (VDT) y el valor q. El VDT se calcula sumando todos los valores deductivos. El valor q representa el número de valores deductivos individuales que son mayor que 5.

Paso 4: Ubicar el índice de condición URCI, empleando el gráfico de la curva URCI. La calificación para una zona de muestreo corresponde al promedio de las calificaciones de las unidades de muestra en la zona de muestreo.

Ejemplo de cálculo Anexo I.

2.2.5. Aplicaciones en contextos urbanos

La aplicación del URCI en áreas urbanas y periurbanas, como las zonas de estudio en los distritos de la ciudad de Tarija, permite detectar tramos críticos y priorizar intervenciones en calles de tierra muy transitadas. Dado que el método es no destructivo, económico y replicable, se alinea con las necesidades de municipios con recursos limitados. Aunque fue diseñado para carreteras rurales, su uso en calles urbanas cortas puede justificarse técnicamente si se mantiene el rigor metodológico en la clasificación de daños y se complementa con registros fotográficos, delimitación precisa de tramos y múltiples observaciones en espacios reducidos (FAO, 2007). Esta flexibilidad operativa hace del URCI una herramienta ideal para evaluar la relación entre deterioro superficial y características del suelo en redes viales no pavimentadas urbanas.

2.3. Cono dinámico de penetración (DCP)

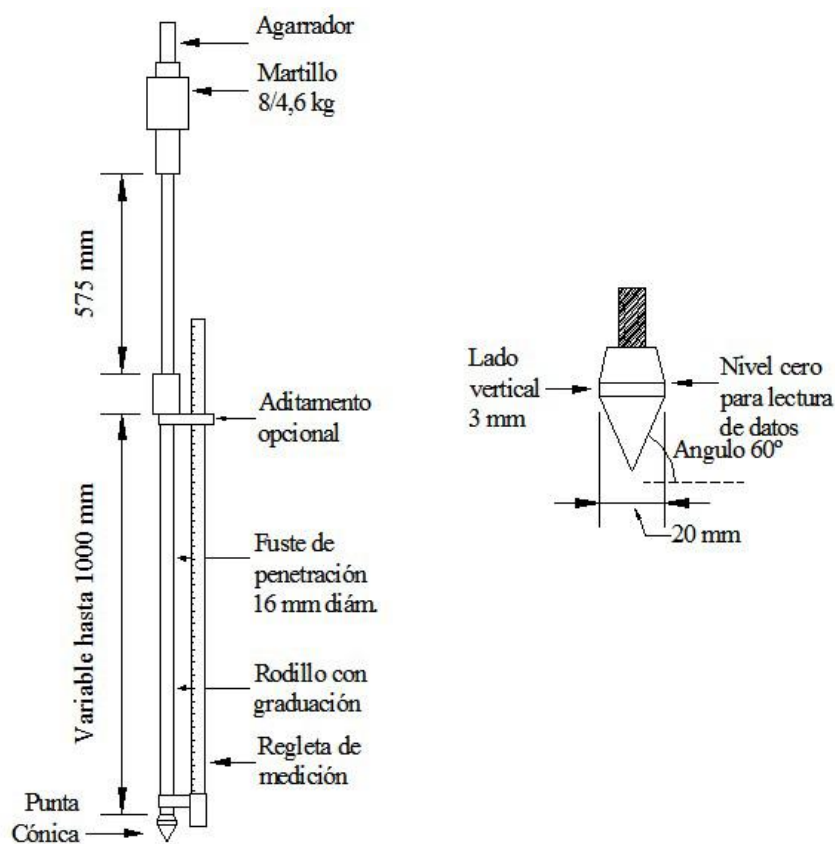
Sirve para la caracterización geotécnica de suelos de subrasantes, reconocimientos rápidos del terreno, controles de calidad de rellenos y capas estabilizadas durante la construcción, detección de anomalías de capas construidas, evaluación de las capas granulares y subrasantes de pavimentos existentes y detección de suelos con características de materiales homogéneos o inadecuados. Los resultados se correlacionan con parámetros del suelo, tales como: la Capacidad de Soporte de California (CBR), el módulo resiliente (MR), la resistencia a la compresión no confinada (q_u) y la densidad relativa de suelos no cohesivos (D_r).

2.3.1. Especificaciones del DCP

Es un equipo, que permite medir la penetración dinámica por golpes de una masa (martillo), que se deja caer libremente desde una altura constante. La penetración es función de la resistencia al corte de la(s) capa(s) que está(n) siendo traspasada(s) por el ensaye. La energía recibida por el yunque es traspasada a la barra y al cono, que perforan las capas de la estructura del material; es, por lo tanto, una medida de la resistencia al corte del suelo.

La Figura muestra un esquema general de las características principales del equipo.

Figura 2.10. Equipo DPC



Fuente: Viscarra Agreda, 2005.

El equipo está compuesto por una barra provista de una punta cónica (cono), atornillada, o embutida con un sistema de bayoneta, a una barra de penetración que se hinca por la energía que recibe el yunque al ser golpeado por el martillo.

a) Cono

Consiste de una punta cónica, de acero, de 60°, seguida de una extensión cilíndrica y una transición cónica de largo igual al diámetro del cono, entre la extensión cilíndrica y la barra de extensión. Se une a la barra de penetración, generalmente, por medio de una unión de hilo o de un pasador tipo bayoneta, de manera que no haya desacople; el cono puede ser perdido o retenido para recuperarlo y utilizarlo en ensayos posteriores. En el caso de reutilizarlo, el desgaste máximo permitido es de 2 mm respecto del diámetro del cono y 1 mm respecto al largo de la punta; la punta cónica no debe presentar deterioros.

b) Barra de penetración

Las dimensiones de las barras en el caso del equipo liviano son de 400 mm, por medio de una barra que se une mediante un hilo. Las barras son de acero al carbono con contenidos de entre 0,8 y 1,2%, templado en baños de aceite. Antes y después de cada ensaye verifique que las barras permanezcan rectas y sin deformaciones; para ello hágalas rodar sobre una superficie plana. Los operadores deben ser capaces de corregir cualquier anomalía. Las barras por utilizar deben ser de un mismo diámetro y la deflexión en el punto medio, medida a partir de una línea recta que une los extremos, no debe exceder 0,5 mm por cada metro.

c) Martillo

El martillo, de acero, debe estar provisto de un orificio central, con un diámetro de 3 a 4 mm mayor que el diámetro de la barra de extensión (Figura 10). La razón entre el largo y el diámetro del martillo debe estar entre 1 y 2. Debe caer libremente, sin ningún obstáculo que pueda afectar su aceleración o frenado. No se debe dejar caer el martillo con una cuerda o de otra forma que no sea directamente con la mano, ya que impide una caída libre. Asegúrese que golpea al yunque correctamente, es decir, que la energía se transmita lo más limpiamente posible, sin deformar el yunque.

d) Yunque

El yunque, debe ser de acero; debe fijarse rígidamente a las barras. Su diámetro no debe ser menor que 100 mm, ni mayor que la mitad del diámetro del martillo. El eje, varilla guía y el martillo no deben presentar deformaciones, aceptándose una máxima de 0,5 mm

por metro; al yunque va unido el mango, que también sirve para indicar en la regla, la profundidad que ha alcanzado la penetración.

Regla de medición. - La regla de medición, debe estar graduada en cm y subdividida en mm.

2.3.2. Procedimiento

e) Posición del equipo

El equipo debe colocarse en forma vertical; la desviación máxima admisible es de 3° respecto de la vertical. El equipo debe estar firmemente soportado y el cono y las barras deben ser guiados al comienzo del ensayo, de modo de mantener rectas las barras.

f) Preparación de la superficie

Para ensayos sobre el terreno natural, remueva la capa superior del suelo vegetal y prepare la superficie hasta dejarla lo más horizontal posible. Cuando el ensayo se efectúe en el interior de una calicata, hágalo sobre una superficie horizontal y registre la profundidad o cota de ensayo.

g) Profundidad de auscultación

Se recomienda una profundidad de exploración del orden de 800 mm.

h) Procedimiento de ensaye

El ensaye, debe ajustarse a los siguientes pasos o etapas:

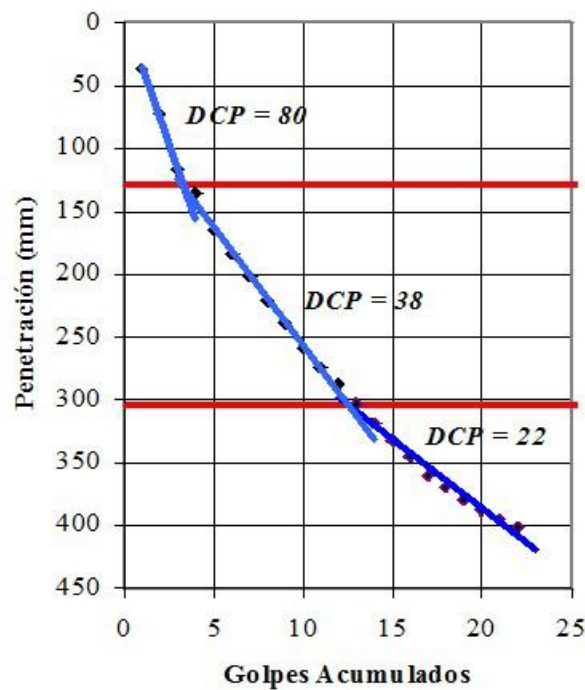
- Fije el instrumento hundiendo el dispositivo con la reglilla en la superficie preparada en el suelo.
- Coloque el instrumento en forma vertical, usando un nivel de burbuja o una plomada y sujételo con el dispositivo con la reglilla.
- El segundo operador sube el martillo deslizante hasta la marca superior y después lo deja caer libremente sobre el yunque.
- El tercer operador registra la penetración lograda en mm para cada golpe, anotando en una planilla.
- Golpee con el martillo con una frecuencia de 5 a 15 golpes por min, sin pausa.

- Si requiere efectuar una detención, gire el cono y mida el torque necesario para el giro, para tener una medida del roce producido entre el sistema de barras y cono, con el suelo perforado.
- Se recomienda despreciar la primera lectura, por razones de acomodo entre el cono y la masa de suelo.

2.3.3. La curva DCP

Gráfica que representa la penetración acumulada en función del número de golpes acumulados para los respectivos datos. En este tipo de curvas, como se muestra en la Figura 9 se puede visibilizar el número de capas existentes representadas por rectas de diferentes pendientes, también se puede determinar el espesor de dichas capas.

Figura 2.11. Curva DCP para una serie de valores.



Fuente: Viscarra Agreda, 2005.

2.4. Análisis estadístico de correlación entre variables

2.4.1. Definiciones

Relación. - Una relación se refiere a la correspondencia o asociación entre dos o más variables, donde cambios en una variable pueden estar vinculados con cambios en otra. Este concepto es amplio y puede manifestarse de diversas formas sin necesariamente implicar una dependencia matemática precisa.

Ejemplo: Existe una relación inversa entre el URCI y el DCP, donde generalmente a mayor resistencia del suelo (menor DCP) se observa mejor condición superficial de la vía (mayor URCI).

Correlación. - La correlación es una medida estadística que cuantifica el grado y la dirección de la relación lineal entre dos variables continuas. Específicamente, indica cómo los cambios en una variable se asocian sistemáticamente con cambios en otra variable.

Ejemplo: El coeficiente de correlación de Pearson de -0,8535 entre URCI y DCP indica una fuerte correlación lineal negativa, donde el 72,84% de la variabilidad en el DCP puede explicarse por su relación lineal con el URCI.

2.4.2. Correlación Lineal

Para dos variables X y Y se utiliza un diagrama de dispersión para mostrar la localización en un sistema de coordenadas rectangulares de los puntos (X, Y). Si todos los puntos en el diagrama están cerca de una línea recta se denomina una correlación lineal. Una correlación es positiva cuando Y tiende a aumentar cuando X aumenta, una correlación es negativa cuando Y tiende a disminuir cuando X aumenta.

2.4.3. Coeficiente de correlación lineal

También conocido como coeficiente de correlación de Pearson (r), determina la relación lineal existente en una muestra entre las variables X y Y, se calcula con la siguiente fórmula:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}}$$

Donde:

r = Coeficiente de correlación lineal de una muestra.

n = Número de pares de datos presentes

$\sum x$ = Suma de todos los valores de x

$\sum x^2$ = Indica que cada valor de x debe elevarse al cuadrado y después deben sumarse esos cuadrados.

$(\sum x)^2$ = Indica que los valores de x deben sumarse y el total elevarse al cuadrado.

$(\sum xy)$ = Indica que cada valor de x debe multiplicarse primero por su valor correspondiente. Después de obtener todos estos productos, se calcula la suma.

2.4.4. Correlación Múltiple

La correlación múltiple se define como el grado de relación existente entre tres o más variables. Al igual que existen rectas de mínimos cuadrados en un diagrama de dispersión para un conjunto de puntos (X , Y), existen planos de mínimos cuadrados en un diagrama tridimensional para un conjunto de N puntos (X_1 , X_2 , X_3). Las ecuaciones del método de mínimos cuadrados son:

$$\sum Z = a_0 N + a_1 \sum X + a_2 \sum Y$$

$$\sum XZ = a_0 \sum X + a_1 \sum X^2 + a_2 \sum XY$$

$$\sum YZ = a_0 \sum Y + a_1 \sum XY + a_2 \sum Y^2$$

2.5. Statgraphics

Es un sistema integral de análisis estadístico y visualización de datos que constituye una herramienta fundamental para la investigación en ingeniería, permite realizar un procesamiento estadístico robusto de los parámetros del suelo, mediante utilidades prácticas como: análisis de regresión simple y múltiple para modelar relaciones entre variables; comparación automatizada de modelos alternativos (lineales, exponenciales, logarítmicos) para identificar la mejor correlación; y generación de diagnósticos completos que validan estadísticamente los modelos. Además, facilita la creación de gráficos de alta calidad para visualizar tendencias y realizar análisis, lo que en conjunto optimiza la identificación de patrones significativos y la obtención de conclusiones confiables sobre el comportamiento mecánico de los suelos estudiados.

2.5.1. Estudio de regresión

El procedimiento de regresión simple se utiliza para ajustar un modelo que relaciona una variable independiente con una variable dependiente. Statgraphics ofrece opciones para seleccionar entre 27 modelos lineales y no lineales, y para ajustar modelos usando ya sea el procedimiento de mínimos cuadrados o el procedimiento de estimación resistente. Las pruebas se realizan para determinar la significancia estadística del modelo, y los residuos y las observaciones influyentes pueden ser graficados. Los coeficientes estimados, errores estándares, t-estadísticas y P-values se muestran para evaluar la importancia de cada parámetro en el modelo.

Para realizar un análisis de regresión, es importante seleccionar la variable dependiente y la variable independiente adecuadamente, y utilizar Statgraphics para calcular el modelo de regresión que mejor se ajuste a los datos.

CAPÍTULO III
CARACTERIZACIÓN,
EVALUACIÓN VIAL Y
ENSAYO DCP

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN, EVALUACIÓN VIAL Y ENSAYO DCP

3.1. Unidades de estudio y decisión muestral

3.1.1. Unidades de estudio

Las unidades de estudio están conformadas por 3 tramos específicos de calles no pavimentadas ubicadas en la ciudad de Tarija. Cada tramo incluirá 10 unidades de muestreo de 230 m², conforme a la metodología del URCI, un punto de muestreo de suelo representativo y un punto de ensayo DCP en la misma sección.

3.1.2. Población

La población de estudio corresponde al conjunto de calles no pavimentadas localizadas en zonas periurbanas de la ciudad de Tarija.

3.1.3. Muestra

La muestra está compuesta por 30 secciones de calles no pavimentadas, seleccionadas de manera intencionada en función del tipo de suelo predominante, tránsito vehicular, nivel de deterioro visual evidente y factibilidad para realizar inspecciones de superficie, muestreo de suelo y ensayo DCP.

Tramo 1.- Avenida Gran Chaco

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Tramo 2.- Barrio Las Velas

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tramo 3.- Avenida 2da Circunvalación

21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

3.1.4. Muestreo

El tipo de muestreo aplicado es no probabilístico por criterios intencionados, considerando como factores de selección: la representatividad de condiciones de deterioro observadas y

la variabilidad espacial dentro de los distritos de estudio para capturar una gama diversa de condiciones de resistencia del suelo.

3.2. Métodos y técnicas empleadas

3.2.1. Selección de métodos

Se aplicó un enfoque cuantitativo correlacional, donde se pretende hallar si existe asociación estadísticamente significativa entre ambas variables. De acuerdo con Walpole (2012), este tipo de estudios requiere establecer primero la existencia de una relación mediante el coeficiente de correlación de Pearson y luego cuantificarla mediante modelos de regresión lineal simple, lo cual es clave para generar herramientas predictivas.

3.2.2. Técnica de muestreo

Las técnicas de muestreo utilizadas son:

- Observación directa: Observar y registrar fenómenos sin intervenir.
- Mediciones de campo: Tomar medidas físicas directamente.
- Ensayo In Situ: Ensayo DCP para medir la resistencia a la penetración del suelo en estado natural.

3.2.3. Instrumentos para la obtención de datos

- Planilla de inspección URCI
- Planilla de campo y equipo para ensayo DCP
- Pico, pala y bolsas de plástico para extracción de muestras.

3.2.4. Procedimiento de aplicación

a. Preparación y selección de tramos

- Levantamiento preliminar mediante Google Earth y visitas exploratorias
- Coordinación con autoridades municipales y vecinos para acceso
- Selección final de los 30 tramos según criterios establecidos
- Delimitación de unidades de muestreo de 230 m² en cada tramo

b. Aplicación del método URCI

- Inspección visual sistemática de cada unidad de muestreo

- Identificación y registro de los 7 tipos de deterioro según manual
- Medición dimensional de cada falla (longitud, área, según corresponda)
- Asignación de niveles de severidad (L, M, H)
- Cálculo de valores deductivos e índice URCI

c. Toma de muestras y clasificación de suelos

- Obtención de muestras alteradas de la capa de rodadura de cada tramo
- Selección de puntos dentro de la unidad de muestreo que sean representativos
- Ensayos de laboratorio de clasificación: análisis granulométrico, límites de Atterberg y contenido de humedad.

d. Procesamiento y análisis estadístico

- Elaboración de curvas DCP (penetración vs. número de golpes)
- Cálculo de tasa de penetración por capas (mm/golpe)
- Estimación de CBR correlacionado cuando aplique
- Análisis estadístico de correlación entre variables
- Elaboración de matrices de resultados y gráficos de dispersión

3.2.5. Preparación previa y requisitos

Preparación del equipo:

- Calibración y verificación del equipo DCP (estado del cono, rectitud de barras)
- Preparación de formatos de campo en físico y digital
- Capacitación en metodología URCI y procedimiento DCP

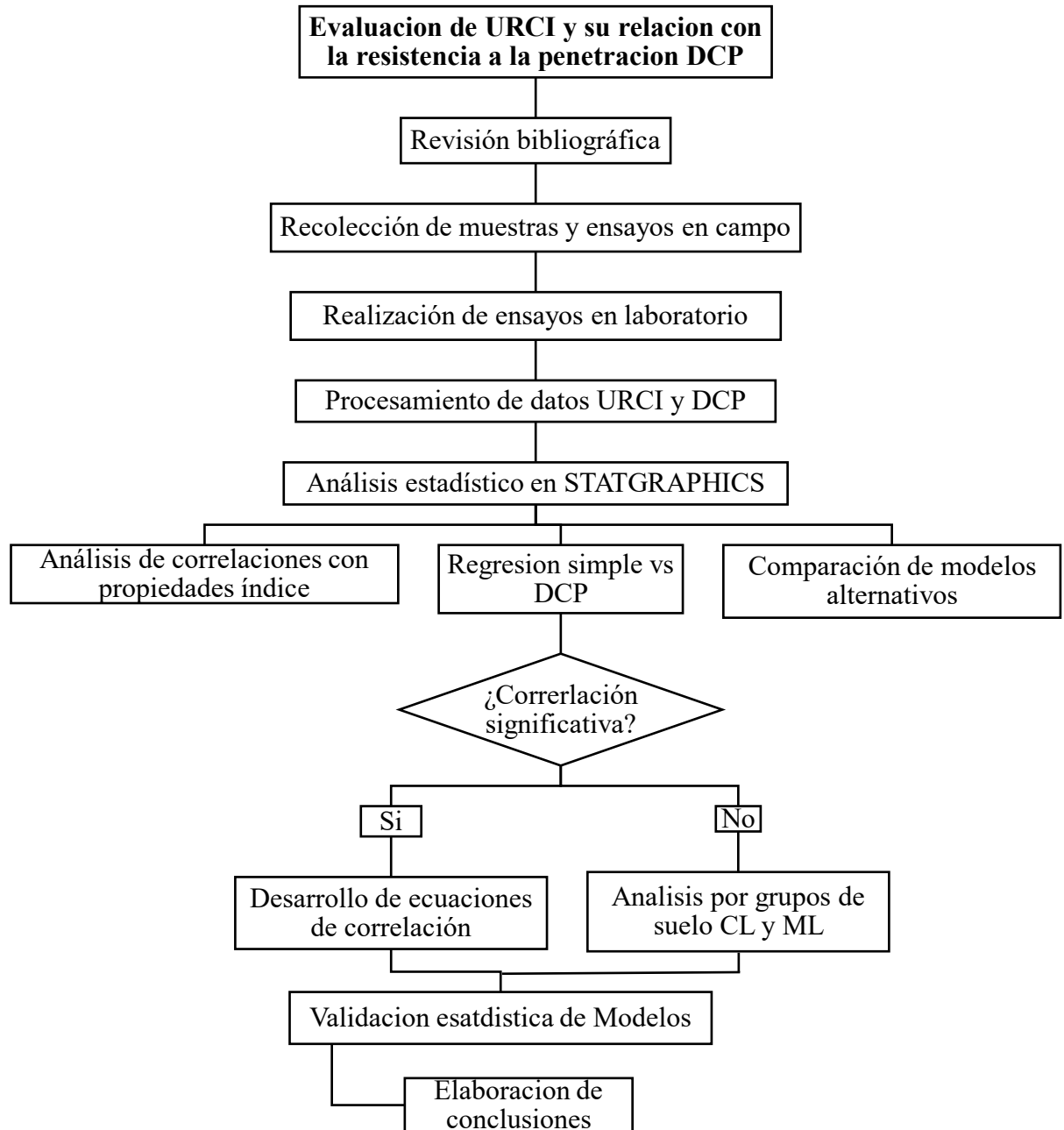
Condiciones de aplicación:

- Época seca para evitar influencia de lluvias recientes en las mediciones
- Horario diurno para adecuada visibilidad en inspecciones
- Condiciones de tránsito que permitan ejecución segura de los ensayos

3.3. Procesamiento de la información

Tipo de estudio	Tamaño mínimo de muestras
Correlacional	30 casos por grupo o segmento de la muestra

3.3.1. Diagrama de flujo



3.4. Ubicación del proyecto

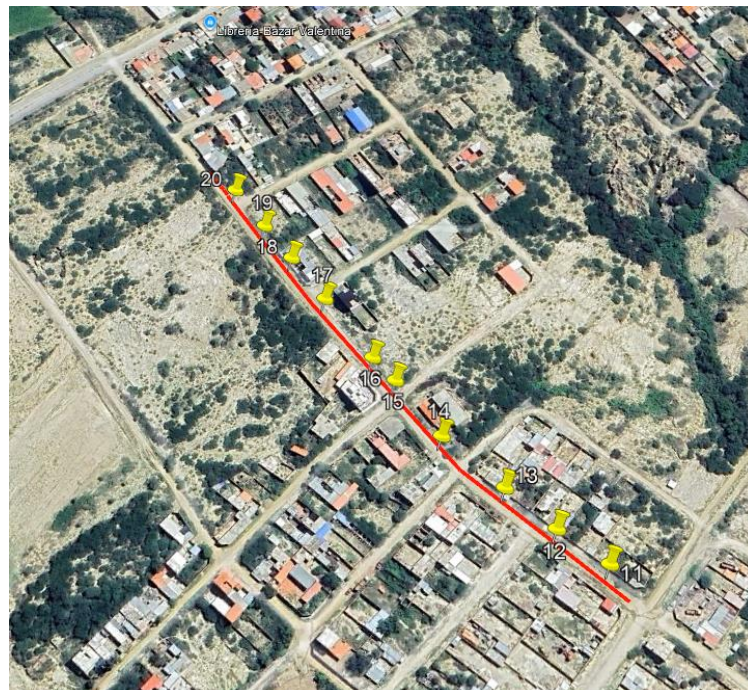
El proyecto se desarrolla en el departamento de Tarija, provincia Cercado, específicamente en los límites de los distritos 8, 9 y 10 donde se seleccionan tramos de vías no pavimentadas, regularmente transitadas y deterioradas para realizar el levantamiento de datos.

Imagen 3.1 Imagen satelital Tramo 1 – Av. Gran Chaco



Fuente: Google Earth

Imagen 3.2 Imagen satelital Tramo 2 – Barrio Las Velas



Fuente: Google Earth

Imagen 3.3 Imagen satelital Tramo 3 – 2da Circunvalación



Fuente: Google Earth

Tabla 3.1. Ubicación de los puntos de estudio

Punto	Coordenadas	
	Este	Norte
1	323125	7619010
2	323169	7619051
3	323205	7619092
4	323233	7619115
5	323265	7619148
6	323296	7619176
7	323373	7619252
8	323424	7619306
9	323467	7619348
10	323504	7619386
11	326848	7615442
12	326817	7615463
13	326786	7615489
14	326747	7615523
15	326717	7615561

Punto	Coordenadas	
	Este	Norte
16	326702	7615577
17	326669	7615620
18	326645	7615651
19	326625	7615676
20	326603	7615704
21	321709	7620932
22	321738	7620932
23	321785	7620929
24	321825	7620925
25	321863	7620920
26	321901	7620915
27	321939	7620909
28	321984	7620903
29	322030	7620898
30	322070	7620895

Fuente: Elaboración propia

3.5. Muestreo y caracterización

Una vez inspeccionada la sección de estudio se determinó el lugar de extracción de muestra de la capa de rodadura, inicialmente retirando el material granular presente en los primeros 0 – 5 cm para luego extraer 1,5 kg de muestra a una profundidad de 5 – 15 cm,

Imagen 3.4 Extracción de material



Fuente: Elaboración propia

3.6. Ensayos de caracterización de materiales

Los ensayos descritos a continuación se realizaron en ambientes del laboratorio de suelo U.A.J.M.S.

3.6.1. Contenido de Humedad

Una vez extraídas las muestras se resguardan en bolsas de plástico para conservar su humedad natural, en laboratorio se da inicio con el pesado de 3 taras por suelo debidamente identificadas, pesamos las taras con el suelo y pesamos nuevamente pasadas las 24 Hrs. en horno.

Imagen 3.5 Vertido de muestra en taras



Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Granulometría

Imagen 3.6 Muestra lavada y secada para tamizar



Fuente: Elaboración propia

Se empleó el método de lavado en las 30 muestras debido al alto contenido de agregado fino existente. Se procedió a lavar con el tamiz N° 200 dejando en una bandeja el contenido retenido del mismo para finalmente dejarlo secar 24Hrs. Una vez secas las muestras se tamizaron con los tamices $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", N°4, N°10, N°40, N°200.

3.6.3. Límites de Atterberg

La muestra de cada suelo es humedecida y colocada en el recipiente del aparato de Casagrande, se separa con el ranurador, se deja caer desde una altura de un 1 cm. El cierre de esa ranura estará entre los 35 y 25 golpes de la cuchara contra la base, se repite el procedimiento añadiendo agua con el fin de que los golpes se hallen entre los rangos requeridos para establecer los puntos de la curva de **límite líquido**.

Imagen 3.7 Muestras pesadas y listas para horno



Fuente: Elaboración propia

Para determinar el **límite plástico** se busca llegar a la barrera del suelo entre estados semisólido y plástico que con cierta humedad empezaran a producir grietas y desmoronamientos, al construir con la mano pequeños cilindros de 3mm de diámetro.

3.7. Evaluación superficial URCI

Índice de Condición de Vías No Pavimentadas se determina mediante inspección visual sistemática en campo. Este procedimiento permitió cuantificar el estado funcional de la superficie de rodadura en base a la identificación y medición de los tipos de deterioro definidos en el manual.

Imagen 3.8 Levantamiento de datos, Falla 86 (huellas)



Fuente: Elaboración propia

3.8. Ensayo DCP

Imagen 3.9 Ejecución del ensayo DCP



Fuente: Elaboración propia

El ensayo se ejecutó en campo para determinar in situ la resistencia a la penetración del suelo de la capa de rodadura y la subrasante, de acuerdo con la norma ASTM D6951. El equipo utilizado consistió en un cono de 60°, un martillo de 8 kg que cae libremente desde una altura de 575 mm, barras de extensión y una regla graduada para la medición.

3.9. Expresión para correlacionar el número DCP con CBR in situ

En el presente estudio se adoptó la ecuación del Transport and Road Research Laboratory (TRRL) $\text{Log}(\text{CBR}) = 2,317 - 0,858 \text{ Log}(\text{DCP})$ como herramienta fundamental para la estimación del CBR in situ a partir de los valores DCP, constituyéndose en el puente metodológico que permitió posteriormente correlacionar este parámetro con el índice URCI. Esta selección se justifica técnicamente en tres aspectos fundamentales: primero, la ecuación TRRL presenta reconocida aplicabilidad para suelos finos con características similares a los ML y CL identificados en los tramos de estudio; segundo, su formulación logarítmica demostró mejor ajuste a la variabilidad de los datos experimentales en comparación con otros modelos lineales simples; y tercero, permitió alcanzar una correlación del 87% entre el CBR estimado y los valores URCI, superando significativamente el umbral mínimo del 50% establecido para considerar una correlación como confiable.

Tabla 3.2. Resumen de resultados

N.º	Límite Líquido %	Límite Plástico %	Índice Plástico %	Humedad Natural %	Clasificación		Granulometría				URCI	DCP	CBR in situ
					SUCS	AASHTO	IG	Grava	Arena	Arcilla/Limo			
1	35,86	20,27	15,59	19,78	CL	A-6	10	2,13	3,09	94,78	56	15,39	1,30
2	27,10	19,16	7,94	5,59	ML	A-4	1	35,38	26,60	38,02	74	5,23	1,70
3	28,79	22,77	6,03	7,49	ML	A-4	8	9,66	9,68	80,66	62	13,74	1,34
4	27,20	21,56	5,64	7,31	ML	A-4	8	4,94	11,04	84,02	70	4,21	1,78
5	25,34	19,30	6,05	9,71	ML	A-4	8	17,61	5,88	76,51	55	17,98	1,24
6	30,10	18,10	12,00	9,62	CL	A-6	10	17,56	6,66	75,78	68	5,36	1,69
7	30,96	16,75	12,00	11,69	CL	A-6	9	4,13	10,90	84,98	63	14,15	1,33
8	19,96	16,53	3,43	5,95	ML	A-4	8	43,71	24,10	32,19	73	4,47	1,76
9	31,10	17,21	13,88	19,06	CL	A-6	10	8,34	13,47	78,19	77	2,55	1,97
10	36,62	20,96	15,66	19,25	CL	A-6	10	8,30	15,20	76,51	65	7,06	1,59
11	29,64	20,19	9,45	7,55	ML	A-4	8	0,96	14,95	84,06	66	14,60	1,32
12	25,91	18,73	7,18	6,40	ML	A-4	8	1,56	14,36	84,07	81	3,52	1,85
13	27,63	17,05	10,58	5,31	CL	A-6	4	27,45	18,04	54,51	68	9,17	1,49
14	27,58	20,76	6,82	5,66	ML	A-4	8	42,01	16,91	41,08	80	3,52	1,85
15	32,87	20,12	12,75	4,12	CL	A-6	9	13,60	10,55	75,85	7433	6,95	1,59

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.3. Resumen de resultados

N° Muestra	Límite Líquido %	Límite Plástico %	Índice Plástico %	Humedad Natural %	Clasificación		Granulometría				URCI	DCP	CBR in situ
					SUCS	AASHTO	IG	Grava	Arena	Arcilla/Limo	1 - 100	mm/golpe	%
16	30,11	19,60	10,51	7,51	CL	A-6	8	13,85	12,12	74,02	75	7,63	1,56
17	27,78	21,29	6,49	11,60	ML	A-4	5	5,8	16,2	78	70	7,25	1,58
18	24,94	20,23	4,71	8,36	ML	A-4	8	6,22	17,53	76,25	79	4,6	1,75
19	28,75	18,57	10,18	8,30	CL	A-6	8	21,05	18,78	60,17	72	6,06	1,65
20	21,25	17,49	3,76	8,12	ML	A-4	8	31,09	25,12	43,78	72	6,09	1,64
21	25,48	18,98	6,51	4,14	ML	A-4	8	2,9	22,62	74,48	70	4,95	1,72
22	26,99	18,05	8,95	5,26	ML	A-4	8	3,44	19,08	77,48	66	6,73	1,61
23	23,87	20,23	3,64	7,17	ML	A-4	8	4,1	20,61	75,29	61	10,51	1,44
24	25,11	18,57	6,55	6,62	ML	A-4	3	29,82	17,71	52,47	84	1,79	2,10
25	25,78	17,49	8,28	3,60	ML	A-4	1	36,43	22,25	41,3	85	1,36	2,20
26	25,78	17,49	8,28	3,60	ML	A-4	1	36,43	22,25	41,3	77	2,08	2,04
27	27,78	21,29	6,49	5,55	ML	A-4	1	38,91	22,3	38,79	75	2,04	2,05
28	24,94	20,23	4,71	7,59	ML	A-4	4	20,63	21,94	57,43	83	1,98	2,06
29	22,83	18,82	4,01	7,40	ML	A-4	8	5,35	13,36	81,36	63	6,85	1,60
30	27,94	20,70	7,24	5,51	ML	A-4	8	5,55	17,23	77,22	71	4,34	1,77

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO IV

PROCESAMIENTO Y

VALIDACIÓN DE

RESULTADOS

CAPITULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

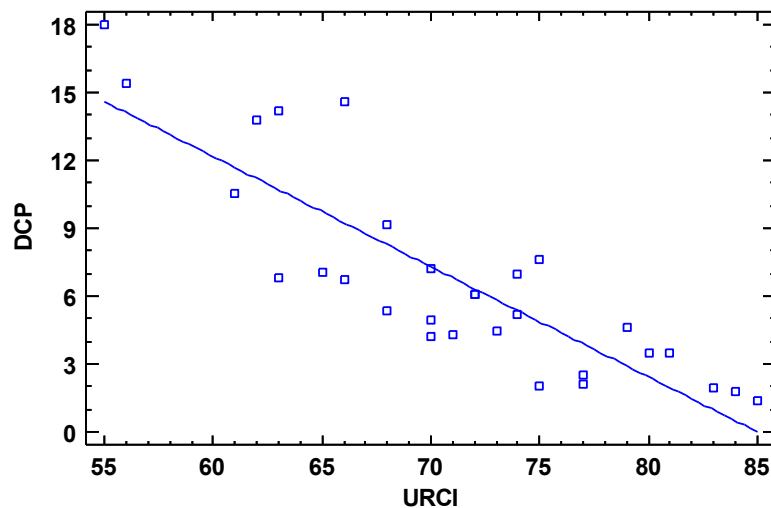
4.1. Procesamiento de datos

Se realizó las correlaciones entre el URCI, DCP y las propiedades índices para conocer la influencia de cada parámetro en la obtención de coeficientes de determinación.

- Analizar las correlaciones obtenidas mediante el coeficiente de determinación r^2 , el cual permite conocer el grado de ajuste alcanzado en los diferentes modelos matemáticos.
- Determinar las conclusiones y recomendaciones basándose en los resultados obtenidos mediante las correlaciones de las propiedades de los suelos en estudio.

4.2. Correlación principal: URCI vs DCP

Figura 4.1. Diagrama de dispersión URCI vs DCP



Fuente: Elaboración propia

Coefficiente de Correlación = -0,853468

R-cuadrada = 72,8408 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 71,8709 porciento

Error estándar del est. = 2,36481

Error absoluto medio = 1,94442

Estadístico Durbin-Watson = 2,21702 (P=0,7201)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,133382

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 72,8408% de la variabilidad en DCP. El coeficiente de correlación es igual a -0,853468, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo para describir la relación entre DCP y URCI. La ecuación del modelo ajustado es:

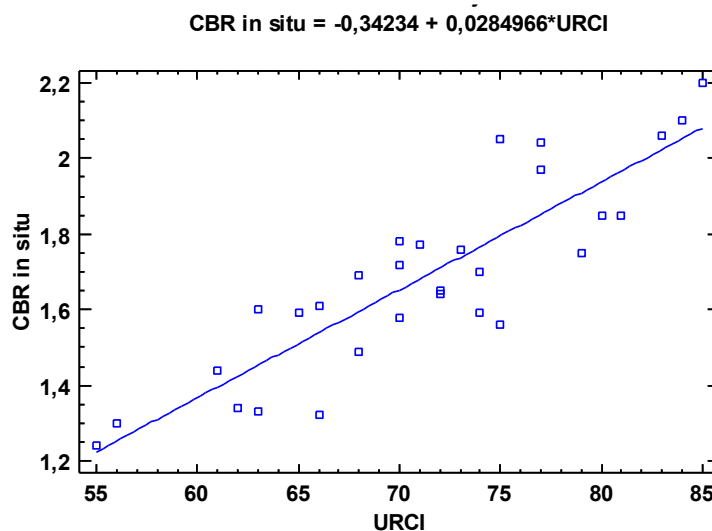
$$\text{DCP} = 41,3242 - 0,48598 \cdot \text{URCI}$$

lo que indica una fuerte correlación negativa entre ambas variables

Validándose así la hipótesis central de la investigación sobre la interdependencia entre el estado superficial de la vía y la resistencia del suelo en contextos urbanos no pavimentados.

4.3. Correlaciones secundarias

Figura 4.2. Diagrama de dispersión URCI vs CBR in situ



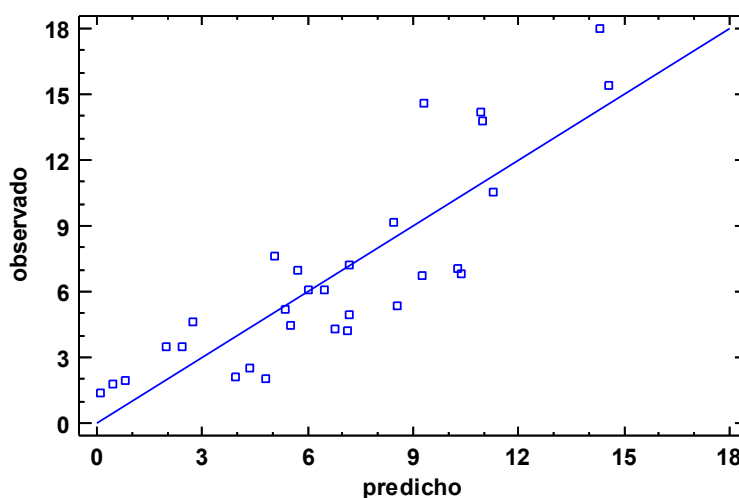
Fuente: Elaboración propia

Coeficiente de Correlación $r = 0,875479$

Si bien el análisis estadístico muestra una correlación aparentemente fuerte entre URCI y CBR in situ ($r = 0,875$), es fundamental precisar que esta relación constituye una correlación secundaria o derivada, donde los valores de CBR provienen de la aplicación previa de la ecuación TRRL sobre datos DCP. Esta condición metodológica implica que la correlación observada no representa una relación directa medida experimentalmente, sino una cadena de inferencias estadísticas ($URCI \rightarrow DCP \rightarrow CBR$) que acumula los errores potenciales de ambos modelos. Su utilidad se limita a complementar el análisis principal, recomendándose que futuras investigaciones validen estos resultados mediante mediciones directas de CBR in situ.

4.4. Regresión Múltiple DCP

Figura 4.3. Gráfico DCP



Fuente: Elaboración propia

DCP = Resistencia a la penetración

URCI = Índice de condición de vías no pavimentadas

IP = Índice plástico

Tabla 4.1. Regresión Múltiple

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	40,263	4,470	9,007	0
URCI	-0,480	0,058	-8,292	0
IP	0,0750	0,131	0,569	0,574

Fuente: Elaboración propia en Statgraphics

Tabla 4.2. Análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	421,819	2	210,91	36,8	0
Residuo	154,727	27	5,731		
Total (Corr.)	576,546	29			

Fuente: Elaboración propia en Statgraphics

R-cuadrada = 73,163 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 71,175 %

Error estándar del est. = 2,394

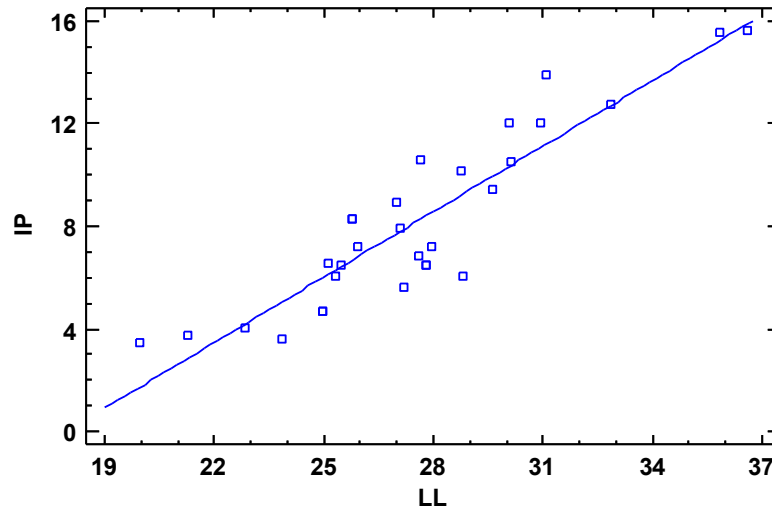
Error absoluto medio = 1,9153

$$DCP = 40,2638 - 0,479663 \cdot URCI + 0,0747106 \cdot IP$$

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,5738, que corresponde a IP. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar IP del modelo.

4.5. Comprobación IP vs LL

Figura 4.4. Diagrama de dispersión IP vs LL



Fuente: Elaboración propia

Coefficiente de Correlación = 0,909637

La correlación IP vs LL ($r = 0,9096$; $R^2 = 82,74\%$) valida la confiabilidad de los ensayos de laboratorio, demostrando que los suelos siguen el comportamiento esperado según los sistemas SUCS y AASHTO. Esta fuerte relación confirma la consistencia metodológica en la determinación de los límites de Atterberg y respalda la clasificación reportada de los suelos estudiados.

4.6. Hipótesis de la investigación

Tabla 4.3. Interpretación del Coeficiente de Pearson

Valor de r (+/-)	Interpretación
0.00	Ausencia de correlación lineal
0.10 a 0.19	Correlación lineal significativa
0.20 a 0.39	Correlación lineal baja-leve
0.40 a 0.69	Correlación lineal moderada
0.70 a 0.99	Correlación lineal alta a muy alta
1	Función lineal perfecta

Fuente: Probabilidad y estadística, Academia Balderix.

De acuerdo con la escala de interpretación del coeficiente de correlación, el valor de $r = -0.8535$ obtenido en el análisis de regresión entre el URCI y el DCP se clasifica dentro del rango de correlación lineal alta a muy alta. Este resultado confirma la existencia de una relación inversa y estadísticamente significativa entre ambas variables, donde a medida que mejora la condición superficial de la vía (URCI aumenta), disminuye la penetración del suelo (DCP se reduce), reflejando una mayor resistencia del material.

4.6.1. Conclusión de la Hipótesis

Se verifica el cumplimiento de la hipótesis principal de la investigación, donde la resistencia a la penetración del suelo medida mediante el ensayo DCP influye significativamente en el valor del Índice de Condición de Vías No Pavimentadas (URCI). El coeficiente de correlación de -0.8535 y el R^2 de 72.84% indican una correlación alta, validando que el modelo de regresión $DCP = 41.3242 - 0.48598 \cdot URCI$ es confiable para predecir el comportamiento de las vías no pavimentadas en el contexto de estudio, donde se establece que a medida que mejora el estado superficial de la vía (URCI aumenta), disminuye la penetración del cono (DCP se reduce), reflejando una mayor resistencia del suelo.

Cabe destacar que esta relación es aplicable específicamente para suelos con clasificación ML (A-4) y CL (A-6) predominantes en los tramos analizados, caracterizados por contenidos significativos de finos que pasan el tamiz #200 y plasticidad de baja a media.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se aplicó la metodología URCI en 30 tramos de vías no pavimentadas de Tarija, obteniendo valores entre 55 y 85, lo que permitió clasificar el estado superficial desde "regular" hasta "muy bueno", demostrando la viabilidad del URCI como herramienta de evaluación visual estandarizada en contextos urbanos periurbanos.
- Los suelos de la capa de rodadura se clasificaron como ML (A-4) y CL (A-6), con altos contenidos de finos (entre 32% y 95%) y plasticidad baja a media. Los ensayos de laboratorio revelaron límites líquidos entre 19,96% y 36,62%, índices plásticos entre 3,43% y 15,66%, y humedades naturales entre 3,60% y 19,78%.
- Los suelos con mayor contenido de finos y plasticidad (tipo CL-A6) presentaron menores valores de URCI y mayores tasas de penetración DCP, evidenciando una mayor susceptibilidad al deterioro superficial.
- Se confirmó una correlación lineal negativa fuerte y estadísticamente significativa entre el URCI y la resistencia a la penetración del suelo medida con DCP, con un coeficiente de correlación de Pearson de $r = -0,8535$ y un $R^2 = 72,84\%$. Esto valida que a mejor estado superficial (URCI alto), menor penetración del cono (DCP bajo), lo que indica mayor resistencia del suelo.
- Se estableció el modelo de regresión lineal simple:

$$DCP = 41,3242 - 0,48598 * URCI$$

Este modelo permite estimar la resistencia a la penetración del suelo a partir de una inspección visual rápida (URCI), con un error estándar de 2,3648 mm/golpe, siendo válido solo para suelos ML y CL.

- Se observó una correlación alta entre URCI y el CBR estimado ($r = 0,875$), aunque se destaca que este valor se deriva indirectamente del DCP mediante la ecuación del TRRL, por lo que su interpretación es complementaria y no sustituye mediciones directas.

- Los resultados de esta investigación permitirán establecer relaciones objetivas entre los valores de penetración DCP y los patrones de deterioro superficial en vías no pavimentadas.
- Este trabajo convierte un problema gestionado tradicionalmente de manera reactiva en un sistema analítico que permite intervenciones más fundamentadas, oportunas y eficientes. Por lo tanto, el aporte final no es solo una ecuación, sino un mecanismo validado para la gestión técnica preventiva de infraestructura vial no pavimentada.

5.2. Recomendaciones

- Utilizar el modelo $DCP = 41.3242 - 0.48598 \cdot URCI$ para la gestión predictiva de vías no pavimentadas en Tarija, aplicándolo específicamente para suelos ML (A-4) y CL (A-6) con contenidos significativos de finos.
- En futuras investigaciones, incorporar variables como intensidad de tránsito, condiciones de drenaje, y métodos de mantenimiento, para mejorar la precisión y aplicabilidad de los modelos predictivos.
- Garantizar precisión en la toma de datos de campo asegurando que las mediciones de deterioros superficiales y penetración se realicen en condiciones uniformes, además del uso de equipos debidamente calibrados para minimizar errores operativos y asegurar la confiabilidad de los datos.
- Considerar el modelo como una herramienta auxiliar para evaluaciones preliminares y diagnósticos rápidos, sin reemplazar los ensayos de laboratorio necesarios para proyectos de mayor envergadura.
- Implementar medidas correctivas y preventivas para eliminar fuentes de filtración de aguas negras y estancamientos en las vías no pavimentadas, ya que estas constituyen una de las causas principales del ablandamiento de la capa de rodadura y la aceleración del deterioro superficial. Se sugiere mejorar el drenaje lateral, reparar tuberías averiadas y diseñar cunetas eficientes que desvíen el agua lluvia y residual lejos de la superficie de rodadura.