

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES**



**EVALUACIÓN DE PASAJES PEATONALES Y CICLOVÍAS DE  
PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO PERMEABLE CON ENFOQUE  
CIUDAD SOSTENIBLE EN EL BOULEVARD LOS ANDES, ALTO  
SELVA ALEGRE-AREQUIPA 2025**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. Raúl Vilca Mamani**

**ORCID: 0009-0008-3650-0978**

**Asesor:**

**Dr. Edgar Vidal Hurtado Chávez**

**ORCID: 0000-0002-6766-7665**

**Para obtener el grado académico de:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES**

**TACNA – PERÚ**

**2026**



**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES**



**EVALUACIÓN DE PASAJES PEATONALES Y CICLOVÍAS DE  
PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO PERMEABLE CON ENFOQUE  
CIUDAD SOSTENIBLE EN EL BOULEVARD LOS ANDES, ALTO  
SELVA ALEGRE-AREQUIPA 2025**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. Raúl Vilca Mamani**

**ORCID: 0009-0008-3650-0978**

**Asesor:**

**Dr. Edgar Vidal Hurtado Chávez**

**ORCID: 0000-0002-6766-7665**

**Para obtener el grado académico de:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES**

**TACNA – PERÚ**

**2026**

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES**

**Tesis**

**"Evaluación de Pasajes Peatonales y Ciclovías de Pavimento Rígido de  
Concreto Permeable con Enfoque Ciudad Sostenible en el Boulevard Los  
Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025"**

Presentada por:

Bach. Raúl Vilca Mamani

**Tesis sustentada y aprobada el 28 de mayo del 2026; ante el siguiente jurado  
examinador:**

**PRESIDENTE: Dr. Anibal Juan ESPINOZA ARANCIAGA**

**SECRETARIO: Mtro. Rolando Gonzalo SALAZAR CALDERÓN JUÁREZ**

**VOCAL: Dr. Diomedes Marcos Martin OYOLA ZAPATA**

**ASESOR: Dr. Edgar Vidal HURTADO CHÁVEZ**

## **DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD**

Yo, Raúl Vilca Mamani, en calidad de: egresado de la Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Transportes de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 42199801. Soy autor de la tesis titulada:

"Evaluación de pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido de concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el boulevard los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025", con asesor(a): Dr. Edgar Vidal Hurtado Chávez.

### **DECLARO BAJO JURAMENTO**

Ser el único autor del texto entregado para obtener el grado académico de **MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN TRANSPORTES**, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara **01%** de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor (a) de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y

a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y fecha: Tacna, 28 de mayo del 2026

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Raúl Vilca Mamani', with a long vertical stroke extending upwards from the end of the signature.

Nombres y apellidos : Raúl Vilca Mamani

DNI : 42199801

## **PAGINA DE DEDICATORIA**

A mis padres, cuyo ejemplo de perseverancia y dedicación me enseñó que los sueños se construyen día a día con esfuerzo y convicción.

A mi familia, por comprender las largas horas de ausencia y por ser el motor que impulsa cada uno de mis proyectos.

A cada persona que transita el Boulevard Los Andes, esperanza viva de que un espacio público bien concebido puede transformar realidades y construir comunidad.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Privada de Tacna, mi alma mater, y a la Escuela de Postgrado, por brindarme el espacio académico y los recursos necesarios para desarrollar esta investigación, así como por su compromiso con la formación de profesionales de excelencia.

A mi asesor, Dr. Edgar Vidal Hurtado Chávez, por su guía paciente, sus enseñanzas y su exigencia académica, fundamentales en cada etapa de este trabajo.

Al Laboratorio de Ensayo de Materiales que hizo posible la realización de los ensayos, así como a todas las personas e instituciones que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de esta investigación.

A mis compañeros de maestría, por las experiencias compartidas y el apoyo mutuo durante estos años de formación.

CARATULA.....	i
PAGINA DEL JURADO.....	iv
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD .....	v
PAGINA DE DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	1
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
INDICE DE APENDICES .....	7
RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
<b>CAPÍTULO I: .....</b>	<b>12</b>
<b>EL PROBLEMA.....</b>	<b>12</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	16
1.2.1. Problema principal .....	16
1.2.2. Problemas secundarios .....	16
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	17
1.3.1. Justificación social .....	17
1.3.2. Justificación metodológica.....	18
1.3.3. Justificación práctica .....	18
1.3.4. Justificación institucional y legal .....	19
1.4. OBJETIVOS.....	19
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivos específicos.....	19
<b>CAPÍTULO II:.....</b>	<b>21</b>

<b>MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>21</b>
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....	21
Antecedentes internacionales.....	21
Antecedentes nacionales.....	23
Antecedentes locales.....	25
2.2. NORMATIVA VIGENTE .....	27
2.2.1. Normativa internacional.....	27
2.2.2. Normativa nacional .....	28
2.2.3. Normativa local.....	31
2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS.....	31
2.3.1. Pasajes peatonales y ciclovías.....	31
2.3.2. Pavimento rígido con concreto permeable .....	34
2.3.3. Teorías fundamentales que sustentan la investigación .....	36
<b>CAPÍTULO III: .....</b>	<b>38</b>
<b>METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO.....</b>	<b>38</b>
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA .....	38
3.1.1. Tipo de investigación .....	38
3.1.2. Nivel de investigación.....	39
3.1.3. Justificación del Enfoque aplicado.....	39
3.2. DISEÑO DEL PROYECTO.....	41
3.2.1. Etapas del proyecto .....	42
3.2.2. Herramientas y software utilizados.....	46
3.3. EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD .....	47
3.3.1. Diseño de pavimentos rígidos con concreto permeable .....	47
3.3.2. Análisis de funcionalidad, seguridad y accesibilidad universal .....	49
3.3.3. Análisis de indicadores de sostenibilidad urbana.....	50
3.3.4. Evaluación del nivel de servicio (LOS) peatonal y ciclista .....	51
3.3.5. Evaluación de nivel de servicio y capacidad operativa.....	54
3.4. PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN.....	55
3.4.1. Cronograma de actividades .....	55
3.4.2. Asignación de recursos.....	56

3.4.3. Costos y financiamiento .....	60
<b>CAPÍTULO IV: .....</b>	<b>62</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>62</b>
4.1. DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO ....	62
4.1.1. Desarrollo del objetivo 1.....	62
4.1.2. Desarrollo y validación del objetivo 2.....	81
4.1.3. Desarrollo y validación del objetivo 3.....	93
4.1.4. Síntesis de la evaluación integral.....	104
4.1.5. Validación técnica del diseño propuesto.....	105
4.2. ANÁLISIS DE IMPACTO, BENEFICIOS Y COMPARACIÓN CON CASOS SIMILARES POR OBJETIVOS .....	106
4.2.1 En función del Objetivo 1: Impacto de los parámetros de diseño....	106
4.2.2 En función del Objetivo 2: Impacto en funcionalidad, seguridad y accesibilidad.....	108
4.2.3 En función del Objetivo 3: Impacto en indicadores de sostenibilidad 109	
4.3. LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS.....	112
DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA Y SU IMPLEMENTACIÓN .....	113
4.3.1. Descripción general de la solución.....	113
4.3.2. Especificaciones técnicas constructivas.....	114
4.3.3. Protocolo de operación y mantenimiento .....	117
4.4. EVALUACIÓN DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A LARGO PLAZO .....	119
4.5.1 Análisis de Costos de Implementación y Operación.....	120
4.5.2 Sostenibilidad Estructural e Hidrológica del Sistema .....	121
4.5.3 Factores Críticos para la Viabilidad a Largo Plazo .....	123
4.5.4 Síntesis de viabilidad.....	124
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>124</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>127</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>129</b>

APÉNDICES .....	134
-----------------	-----

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Los parámetros evaluados</i> .....	53
<b>Tabla 2</b> <i>Cronograma general de actividades de investigación</i> .....	56
<b>Tabla 3</b> <i>Asignación de recursos humanos</i> .....	57
<b>Tabla 4</b> <i>Asignación de recursos para trabajo de campo</i> .....	57
<b>Tabla 5</b> <i>Asignación de recursos para equipos y materiales</i> .....	58
<b>Tabla 6</b> <i>Asignación de recursos para software</i> .....	58
<b>Tabla 7</b> <i>Asignación de recursos para procesamiento y simulación</i> .....	59
<b>Tabla 8</b> <i>Asignación de recursos para gastos administrativos</i> .....	59
<b>Tabla 9</b> <i>Asignación de recursos para difusión y presentación</i> .....	59
<b>Tabla 10</b> <i>Resumen de costos del proyecto de investigación</i> .....	60
<b>Tabla 11</b> <i>Características y procedencia de los materiales</i> .....	62
<b>Tabla 12</b> <i>Caracterización del agregado grueso - Cantera Chiguata</i> .....	63
<b>Tabla 13</b> <i>Criterios de diseño para concreto permeable</i> .....	64
<b>Tabla 14</b> <i>Dosificaciones de las mezclas de concreto permeable</i> .....	65
<b>Tabla 15</b> <i>Programa de ensayos de compresión</i> .....	66
<b>Tabla 16</b> <i>Programa de ensayos de flexión</i> .....	66
<b>Tabla 17</b> <i>Programa de ensayos de permeabilidad sobre losas (ASTM C1701) ..</i>	67
<b>Tabla 18</b> <i>Resumen total de especímenes</i> .....	67
<b>Tabla 19</b> <i>Resultados de resistencia a la compresión</i> .....	71
<b>Tabla 20</b> <i>Resultados de resistencia a la flexión (28 días)</i> .....	71
<b>Tabla 21</b> <i>Resumen de resultados de permeabilidad</i> .....	72
<b>Tabla 22</b> <i>Comparación de permeabilidad promedio</i> .....	73
<b>Tabla 23</b> <i>Resumen comparativo de resultados a 28 días</i> .....	75
<b>Tabla 24</b> <i>Evaluación multicriterio para selección de mezcla óptima</i> .....	77
<b>Tabla 25</b> <i>Ficha técnica - Mezcla de concreto permeable MP-01</i> .....	78
<b>Tabla 26</b> <i>Equipos empleados en el levantamiento topográfico</i> .....	82
<b>Tabla 27</b> <i>Criterios de diseño geométrico adoptados</i> .....	84

<b>Tabla 28</b> <i>Parámetros de diseño estructural</i> .....	85
<b>Tabla 29</b> <i>Características de la sub-base granular drenante</i> .....	87
<b>Tabla 30</b> <i>Estructura del pavimento permeable propuesto</i> .....	88
<b>Tabla 31</b> <i>Planos de diseño generados</i> .....	89
<b>Tabla 32</b> <i>Metrados estimados para la intervención</i> .....	90
<b>Tabla 33</b> <i>Intensidades de precipitación (mm/h) - SENAMHI Arequipa</i> .....	93
<b>Tabla 34</b> <i>Parámetros IDF para simulación</i> .....	93
<b>Tabla 35</b> <i>Subcuencas delimitadas</i> .....	94
<b>Tabla 36</b> <i>Sección transversal (diseño normativo)</i> .....	96
<b>Tabla 37</b> <i>Parámetros LID para pavimento permeable MP-01</i> .....	97
<b>Tabla 38</b> <i>Parámetros para adoquines</i> .....	98
<b>Tabla 39</b> <i>Escenario actual (sin pavimento permeable)</i> .....	98
<b>Tabla 40</b> <i>Escenario proyectado (con pavimento permeable)</i> .....	99
<b>Tabla 41</b> <i>Resumen comparativo de simulación hidrológica(escenario actual vs proyectado)</i> .....	100
<b>Tabla 42</b> <i>Balace hídrico para lluvia de 10 años</i> .....	101
<b>Tabla 43</b> <i>Capacidad remanente del sistema</i> .....	101
<b>Tabla 44</b> <i>Análisis de impacto ambiental</i> .....	102
<b>Tabla 45</b> <i>Comparación de resultados con estudios nacionales previos</i> .....	111
<b>Tabla 46</b> <i>Resumen ejecutivo de costos</i> .....	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Ubicación del área de estudio - Boulevard Los Andes</i> .....	40
<b>Figura 2</b> <i>Curva granulométrica del agregado grueso - Cantera Chiguata</i> .....	63
<b>Figura 3</b> <i>Probetas cilíndricas para ensayos de compresión</i> .....	68
<b>Figura 4</b> <i>Vigas para ensayos de flexión</i> .....	69
<b>Figura 5</b> <i>Losas de 40×40×15 cm para ensayos de permeabilidad</i> .....	69
<b>Figura 6</b> <i>Ensayo de permeabilidad según ASTM C1701 (laboratorio)</i> .....	70
<b>Figura 7</b> <i>Relación resistencia-permeabilidad de las mezclas evaluadas</i> .....	76
<b>Figura 8</b> <i>Levantamiento topográfico con estación total Leica TS06</i> .....	83
<b>Figura 9</b> <i>Modelo digital del terreno (DTM) en Civil 3D</i> .....	83
<b>Figura 10</b> <i>Sección transversal tipo del Boulevard Los Andes</i> .....	88
<b>Figura 11</b> <i>Modelo 3D del corredor</i> .....	90
<b>Figura 12</b> <i>Delimitación de subcuencas</i> .....	95
<b>Figura 13</b> <i>Modelo hidrológico en PCSWMM 2025</i> .....	95
<b>Figura 14</b> <i>Resultados de simulación - Comparación de escorrentía</i> .....	100

**INDICE DE APENDICES**

Apendice 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA .....	134
Apendice 2 Certificados de ensayo de laboratorio.....	135
Apendice 3 Planos de diseño (referencia).....	142

## RESUMEN

La presente investigación aplicada tuvo como objetivo evaluar los pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable con enfoque de ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes, distrito de Alto Selva Alegre, Arequipa, durante el año 2025. El estudio partió de la problemática de infraestructura deteriorada, ausencia de espacios seguros para ciclistas e ineficiente manejo de aguas pluviales. Metodológicamente, se estructuró en tres objetivos específicos desarrollados secuencialmente: (1) determinación de parámetros de diseño mediante ensayos de laboratorio, (2) análisis de funcionalidad, seguridad y accesibilidad a través de modelado geométrico y estructural, y (3) mejora de indicadores de sostenibilidad mediante simulación hidrológica. Los ensayos de laboratorio permitieron seleccionar la mezcla óptima MP-01 (cemento YURA MAX 350 kg/m<sup>3</sup>, piedra chancada de Cantera Chiguata 1450 kg/m<sup>3</sup>, agua 119 kg/m<sup>3</sup>, relación a/c=0.34), que alcanzó resistencia a compresión de 26.17 MPa, módulo de rotura de 3.78 MPa y capacidad de infiltración de 311.9 mm/h, cumpliendo holgadamente los objetivos establecidos. Con estos valores, se diseñaron veredas de 2.00 m, ciclovías unidireccionales de 1.50 m a cada lado y calzada de 3.30 m con adoquines, verificando el espesor de losa de 15 cm mediante el método AASHTO 93. Se concluye que la adopción del pavimento de concreto permeable MP-01 constituye una alternativa técnica, social y ambientalmente viable, constituyendo un modelo replicable en contextos urbanos de la región andina.

**Palabras clave:** Accesibilidad universal, Concreto permeable, ciclovías, movilidad sostenible, drenaje urbano.

## ABSTRACT

This applied research aimed to evaluate pedestrian walkways and bike lanes made of rigid pervious concrete pavement under a sustainable city approach at Boulevard Los Andes, located in the district of Alto Selva Alegre, Arequipa, during the year 2025. The study started from the problems of deteriorated infrastructure, absence of safe spaces for cyclists, and inefficient stormwater management. Methodologically, it was structured into three specific objectives developed sequentially: (1) determination of design parameters through laboratory tests, (2) analysis of functionality, safety and accessibility through geometric and structural modeling, and (3) improvement of sustainability indicators through hydrological simulation. Laboratory tests allowed the selection of the optimal mix MP-01 (YURA MAX cement 350 kg/m<sup>3</sup>, crushed stone from Chiguata Quarry 1450 kg/m<sup>3</sup>, water 119 kg/m<sup>3</sup>, w/c ratio=0.34), which achieved a compressive strength of 26.17 MPa, a modulus of rupture of 3.78 MPa, and an infiltration capacity of 311.9 mm/h, comfortably meeting the established goals. With these values, 2.00 m sidewalks, one-way bike lanes of 1.50 m on each side, and a 3.30 m roadway with pavers were designed, verifying the slab thickness of 15 cm using the AASHTO 93 method. It is concluded that the adoption of MP-01 pervious concrete pavement constitutes a technically, socially, and environmentally viable alternative, representing a replicable model in urban contexts of the Andean region.

**Keywords:** Universal accessibility, pervious concrete, bike lanes, sustainable mobility, urban drainage.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación surgió de la inquietud por abordar una situación que afecta cotidianamente a los habitantes y visitantes de un espacio público emblemático en la ciudad de Arequipa. El Boulevard Los Andes, situado en el distrito de Alto Selva Alegre, constituye un punto de encuentro y tránsito para numerosas personas que se desplazan a pie, en bicicleta o en vehículos motorizados. Durante el desarrollo del estudio, se pudo constatar que quienes recorren este lugar se enfrentan a veredas en mal estado, a la ausencia de carriles exclusivos para bicicletas y a problemas recurrentes de acumulación de agua durante la época de lluvias, situaciones que merman su calidad de vida y desalientan formas de movilidad más saludables y respetuosas con el medio ambiente.

La investigación se estructuró en torno a tres objetivos específicos, desarrollados secuencialmente: el primero orientado a determinar los parámetros de diseño del concreto permeable mediante ensayos de laboratorio; el segundo enfocado en analizar la influencia de la funcionalidad, seguridad y accesibilidad en el diseño geométrico y estructural; y el tercero dirigido a evaluar la mejora en los indicadores de sostenibilidad urbana a través de simulación hidrológica y validación. Esta estructura por objetivos permitió una progresión lógica desde la caracterización del material hasta la validación integral de la propuesta.

El documento se organiza en cuatro capítulos. El primero presenta la situación problemática que se encontró al inicio del estudio y las metas que se persiguieron. El segundo recoge los antecedentes, las normas aplicables y los conceptos fundamentales que sirvieron de base. El tercero describe el camino metodológico que efectivamente se siguió, detallando los cinco pasos que estructuraron el trabajo. Finalmente, el cuarto capítulo expone los hallazgos

obtenidos y reflexiona sobre su significado, cerrando con las conclusiones y sugerencias para futuras intervenciones.

Se espera que este estudio constituya un aporte al desarrollo de una movilidad más humana y sostenible en Arequipa, y que sirva de inspiración para otras ciudades de la región andina que enfrentan desafíos similares.

## **CAPÍTULO I: EL PROBLEMA**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El Boulevard Los Andes, ubicado en el distrito de Alto Selva Alegre en la provincia y departamento de Arequipa, constituye un espacio público de gran importancia para la comunidad local. Al iniciar la investigación, se pudo observar que diariamente este corredor urbano es transitado por numerosas personas que se desplazan a pie, así como por ciclistas que lo utilizan tanto para movilizarse como para realizar actividad física y recreativa. También circulan vehículos automotores que emplean la calzada existente como parte de su ruta habitual.

Durante las primeras visitas de campo realizadas en diciembre de 2025, se evidenciaron múltiples deficiencias que afectan directamente la calidad de vida de sus usuarios. Los peatones se enfrentan a superficies deterioradas, con hundimientos y pavimentos irregulares, e incluso zonas donde las veredas son inexistentes o se encuentran en muy mal estado. Esta situación genera una sensación permanente de inseguridad y aumenta el riesgo de accidentes, especialmente para los grupos más vulnerables como niños pequeños y adultos mayores, quienes ven limitada su autonomía para desplazarse.

Por su parte, los ciclistas se ven forzados a compartir la calzada con vehículos motorizados al no existir ciclovías segregadas que les ofrezcan un espacio seguro y exclusivo. Esta convivencia forzada con el tráfico vehicular no solo desalienta el uso de la bicicleta como medio de transporte sostenible, sino que también expone a quienes pedalean a situaciones de peligro constante, limitando el desarrollo de una cultura ciclista en la zona.

Se pudo constatar que esta problemática no es un hecho aislado, sino que responde a un modelo de planificación urbana que históricamente ha privilegiado la movilidad vehicular por encima de otras formas de desplazamiento. Las consecuencias de este enfoque son diversas y afectan múltiples aspectos de la vida cotidiana: la contaminación ambiental se incrementa, los niveles de ruido se vuelven molestos, los espacios pensados para el descanso y la recreación pierden su función original y, en conjunto, se produce un deterioro progresivo de la calidad de vida urbana y la pérdida del confort humano en el espacio público.

A esta situación se suma una condición climática particular que agrava los problemas existentes. Durante los meses de verano, la zona experimenta precipitaciones pluviales que, al encontrar superficies mayoritariamente impermeables, generan escorrentía superficial, acumulación de agua y formación de charcos que dificultan aún más la movilidad peatonal y ciclista. La falta de infraestructura que permita la absorción natural del agua de lluvia representa una oportunidad perdida para gestionar de manera sostenible este recurso.

Durante la revisión bibliográfica realizada en la primera etapa de la investigación, se encontró que diversos estudios desarrollados en otros países han demostrado el potencial de los pavimentos permeables para abordar problemáticas urbanas similares a las que presenta el Boulevard Los Andes. Investigadores como Kia, A. (2023) han señalado que los pavimentos permeables constituyen una alternativa efectiva para reducir las inundaciones y mitigar el efecto isla de calor en entornos urbanos, contribuyendo así a mejorar la capacidad de adaptación de las ciudades frente al cambio climático.

Por su parte, Lu y colaboradores (2019) han puesto de relieve la durabilidad y eficacia de estos materiales para el manejo de las aguas pluviales, características que resultan especialmente valiosas para una ciudad como Arequipa, donde se alternan períodos secos con temporadas de precipitaciones. Haselbach y Valavala (2006), en un estudio publicado en *Cement and Concrete Research*, analizaron la resistencia del concreto permeable al ataque de sales

anticongelantes y a la carbonatación. Los autores confirmaron que el material mantiene su capacidad de infiltración tras la exposición a sustancias agresivas, lo cual respalda su durabilidad en climas con marcadas variaciones estacionales, como el de Arequipa.

El Comité Técnico del American Concrete Institute (2010), a través de su documento ACI 522R-10, ha proporcionado las bases para el diseño de mezclas de concreto permeable, definiendo los rangos adecuados de resistencia, contenido de vacíos y relaciones agua/cemento. Asimismo, Scholz y Grabowiecki (2007), en una revisión amplia de experiencias con pavimentos permeables alrededor del mundo, documentaron reducciones significativas en el escurrimiento superficial y en la carga de contaminantes.

La guía elaborada por Tennis, Leming y Akers (2004) para la Portland Cement Association ha sido durante años un referente metodológico para el diseño, construcción y evaluación de pavimentos de concreto permeable, estableciendo pautas que han sido adoptadas internacionalmente.

Dentro del Perú, se identificaron diversas investigaciones que han abordado la problemática de la movilidad sostenible y el uso de pavimentos permeables como posible solución. Cuicapuza (2023) propuso sistemas de drenaje para ciclovías urbanas empleando concreto permeable, resaltando su buen comportamiento ambiental y su capacidad para adaptarse a las condiciones del país.

Rengifo y Valles (2019) validaron el uso de este material en regiones andinas, desarrollando mezclas para ciclovías en Tarapoto que alcanzaron resistencias mecánicas adecuadas y capacidades de infiltración superiores a 300 mm/h. Rojas y Chicmana (2017) promovieron el ciclismo urbano en Lima, demostrando que la existencia de infraestructura ciclista segregada reduce en 35% la percepción de riesgo entre los usuarios.

Guizado Barrios, A.X., Curi Grados, E.R.P. (2017) evaluaron el concreto permeable en vías costeras del noroeste peruano, registrando tasas de infiltración de hasta 620 mm/h y reducciones de escorrentía del orden del 85%. Cobos (2023) implementó pavimentos permeables en ciclovías de Comas,

logrando un incremento del 38% en el uso de la bicicleta y una relación beneficio-costo de 2.1.

Peralta Rodríguez y Huamolles Rengifo (2023), en su tesis desarrollada en Tacna, demostraron que la caracterización adecuada de agregados locales es crucial para optimizar mezclas de concreto permeable. Araujo Mego y Roman Cordova (2019), en su investigación en Tarapoto, validaron el uso de las normas ACI 522R-10 y ASTM C1701 en la Amazonía peruana.

En la propia ciudad de Arequipa, se encontraron estudios que han identificado problemáticas similares a las que presenta el Boulevard Los Andes. Ramos (2021) determinó una evaluación estructural del pavimento en la Avenida Lambramani, identificando hundimientos y fisuras asociados a problemas de drenaje, y proponiendo el uso de concreto permeable en las zonas críticas.

Guerra Chayña y Guerra Ramos (2020) desarrollaron una investigación sobre el diseño de pavimentos rígidos permeables como sistema urbano de drenaje sostenible para suelos volcánicos en Juliaca, cuyos hallazgos resultan relevantes para el contexto arequipeño. Torres (2022) demostró la efectividad del software Civil 3D para el diseño geométrico de carreteras que incorporan ciclovías y aceras peatonales.

Cabrera y Roque (2021) aportaron metodologías de evaluación geotécnica para vías urbanas en Arequipa. La Defensoría del Pueblo (2022) reportó que el 60% de los usuarios perciben inseguridad en las vías urbanas de Arequipa, dato que fundamenta la necesidad de intervenciones que mejoren la percepción de seguridad. Finalmente, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2023) viene promoviendo activamente la implementación de ciclovías en Arequipa como parte de una estrategia más amplia para reducir la contaminación ambiental y mejorar la salud pública.

La presente investigación adquirió especial relevancia en tanto buscó abordar de manera integral las múltiples problemáticas identificadas en el Boulevard Los Andes, proponiendo una solución innovadora pero técnicamente sólida: la implementación de pasajes peatonales y ciclovías

construidos con pavimento rígido de concreto permeable en un tramo representativo de dos cuadras, que suman 140 metros lineales.

Esta propuesta integró diversos criterios que la enriquecieron y la hicieron pertinente para el momento actual: consideró la movilidad activa como eje central, incorporó principios de accesibilidad universal que garantizan que todas las personas puedan utilizar el espacio independientemente de sus capacidades físicas, planteó una gestión sostenible de las aguas pluviales y contribuyó a mitigar el efecto isla de calor tan característico de las zonas urbanas densamente pavimentadas.

Todo ello se alinea perfectamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por Naciones Unidas, particularmente con el ODS 11, que busca lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, y con el ODS 13, que promueve la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

La transformación propuesta para el Boulevard Los Andes aspira a convertirlo en un modelo de movilidad activa y resiliencia urbana para la ciudad de Arequipa, generando un referente que pueda ser aplicado posteriormente en otros contextos urbanos de características similares dentro de la región andina, multiplicando así el impacto positivo de la investigación.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema principal**

¿Cómo evaluar los pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025?

### **1.2.2. Problemas secundarios**

a) ¿Calcular los parámetros de diseño de pavimentos rígidos con concreto permeable para pasajes peatonales y ciclovías en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025?

- b) ¿Cómo afectan la funcionalidad, seguridad y accesibilidad vial en el diseño de pasajes peatonales y ciclovías en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025?
- c) ¿Cómo puede mejorar los indicadores de sostenibilidad urbana con la implementación de pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025?

### **1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1. Justificación social**

Desde una perspectiva social, el proyecto buscó mejorar la calidad de vida de las personas que residen en las inmediaciones del Boulevard Los Andes, así como de quienes lo transitan diariamente por motivos laborales, educativos o recreativos. Se pretendió promover una movilidad más inclusiva y segura que beneficie a todos los usuarios por igual.

El diseño de pasajes peatonales y ciclovías con concreto permeable facilitará el acceso universal al espacio público, reduciendo las barreras físicas que actualmente dificultan el desplazamiento de personas con discapacidades, familias que se trasladan con niños pequeños y adultos mayores que ven limitada su autonomía. Esta mejora en la accesibilidad fomentará la interacción comunitaria y contribuirá a disminuir los riesgos de accidentes viales.

Cobos (2023) ha demostrado en su investigación que la implementación de infraestructuras como las ciclovías genera beneficios directos en términos de equidad social, al hacer que el transporte sea más accesible para sectores de la población que tradicionalmente han sido vulnerables. La reducción del 35% en la percepción de riesgo vial documentada por Rojas y Chicmana (2017) transformará la experiencia de usar el espacio público.

Esta iniciativa no solo mejora la calidad de vida al reducir los riesgos viales, sino que también fomenta estilos de vida más activos y saludables, contribuyendo a la prevención de enfermedades no transmisibles como la

obesidad, la diabetes y las enfermedades cardiovasculares, al tiempo que fortalece los lazos de cohesión social entre los miembros de la comunidad.

### **1.3.2. Justificación metodológica**

La investigación adoptó un enfoque claramente cuantitativo y se situó en un nivel aplicativo, integrando diversas técnicas de medición directa, modelado geométrico utilizando el software Civil 3D, simulación hidrológica mediante PCSWMM y evaluación multicriterio de los resultados obtenidos. Esta combinación metodológica, rigurosa y perfectamente reproducible, permitió validar técnicamente la propuesta y generar un protocolo que pueda ser aplicado en otros contextos urbanos.

El diseño de la investigación fue de tipo no experimental, con un alcance transeccional descriptivo-proyectivo, estructurado en dos fases claramente diferenciadas pero complementarias. La primera fase, de carácter diagnóstico, permitió caracterizar el estado actual de la infraestructura, mientras que la segunda fase, de naturaleza proyectiva, condujo a la formulación de la propuesta de mejora.

Esta estructura garantizó un análisis integral que abarcó desde la comprensión profunda de la situación existente hasta la elaboración detallada de una solución técnicamente fundamentada.

### **1.3.3. Justificación práctica**

La investigación generó como producto final un modelo técnico-operativo completo, que incluye especificaciones de diseño detalladas, la formulación de mezclas de concreto permeable validadas en laboratorio, un presupuesto referencial elaborado según la estructura del Sistema de Contrataciones del Estado y un cronograma de ejecución realista y factible.

Este producto puede ser utilizado directamente por municipalidades, empresas consultoras y entidades públicas interesadas en implementar soluciones similares en otros sectores de la ciudad o en diferentes localidades de la región, optimizando así los recursos invertidos y garantizando la sostenibilidad de las intervenciones a largo plazo.

La intervención propuesta, limitada a 140 metros lineales, representa una escala perfectamente manejable que permite la implementación por etapas sin afectar significativamente la circulación vehicular en la zona. Se emplearán técnicas constructivas convencionales con adaptaciones menores y se utilizarán materiales locales fácilmente disponibles.

#### **1.3.4. Justificación institucional y legal**

Desde la perspectiva institucional, el proyecto se enmarcó perfectamente dentro de los lineamientos del Plan de Movilidad Urbana Sostenible 2023-2027 de la ciudad de Arequipa, que pone especial énfasis en la expansión de la red de ciclovías como estrategia para mejorar la calidad de vida urbana. Contó además con el respaldo normativo del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

La Municipalidad Distrital de Alto Selva Alegre manifestó su disposición a integrar este corredor dentro de su plan de peatonalización comercial, lo que facilitó enormemente la obtención de los permisos necesarios para llevar a cabo la intervención.

En el plano legal, la investigación se sustentó en un marco normativo sólido que incluyó la Ley N° 30996 (uso de la bicicleta), el Reglamento Nacional de Edificaciones (Normas A.120 y U.010) y las Normas Técnicas Peruanas (NTP 339.185, 2018), entre otras disposiciones aplicables.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar los pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a) Realizar el cálculo de los parámetros de diseño de pavimentos rígidos con concreto permeable para pasajes peatonales y ciclovías en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025.

- b) Determinar los efectos de la funcionalidad, seguridad y accesibilidad universal para el diseño de pasajes peatonales y ciclovías en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025.
- c) Mejorar los indicadores de sostenibilidad urbana con la implementación de pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido de concreto permeable en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025.

## **CAPÍTULO II:**

### **MARCO REFERENCIAL**

#### **2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA**

##### **Antecedentes internacionales**

Los experimentos de Haselbach y Valavala (2006) demostraron que la capacidad de infiltración del concreto permeable se mantiene estable incluso tras la exposición a agentes químicos agresivos como las sales anticongelantes. Esta propiedad resulta especialmente valiosa para contextos climáticos con marcadas variaciones estacionales, como el de Arequipa, donde los ciclos húmedo-seco podrían afectar el desempeño de materiales convencionales. Los resultados obtenidos de los experimentos de laboratorio indicaron que este material sostiene su integridad estructural a pesar de las fluctuaciones climáticas, lo que sugiere que podría ser utilizado en gran medida en pavimentos de ciudades con cambios climáticos significativos. La investigación concluye afirmando que el concreto permeable expuesto a sales y variaciones ambientales mantiene casi por completo su capacidad de filtración, lo que lo posiciona como un material idóneo para lugares con patrones de sequía y humedad similares a los que se experimentan en el área de Arequipa.

El trabajo sobre pavimentos permeables y cambio climático; Más recientemente, un equipo de investigadores liderado por Kia, A. (2023) llevó a cabo una revisión exhaustiva de más de un centenar de estudios previos sobre pavimentos que permiten la infiltración del agua. Su trabajo, publicado en una revista especializada en temas ambientales, puso de relieve varios beneficios de estos sistemas: logran reducir la temperatura de la superficie en

aproximadamente 9 grados centígrados, mejoran el drenaje en las ciudades y tienen una vida útil que supera los 15 años, incluso cuando se enfrentan a condiciones climáticas extremas. Para nuestro contexto, resulta especialmente valiosa su propuesta de diseños multicapa adaptados a suelos de origen volcánico, como los que encontramos en gran parte de la región andina.

La propuesta innovadora de Lu, Liu, Wang, Faßbender, Wang y Oeser (2019) desarrollaron un pavimento permeable innovador utilizando agregados cerámicos reciclados combinados con un ligante de origen biológico. Los resultados de su trabajo, publicados en el *Journal of Cleaner Production*, demostraron que este material presenta alta durabilidad y notable eficiencia en la gestión de aguas pluviales, validando su aplicabilidad en proyectos de ciclovías y áreas peatonales. Esta investigación abre nuevas posibilidades para la economía circular en el sector de la construcción.

El panorama global trazado por Scholz y Grabowiecki (2007) publicaron en *Building and Environment* una revisión exhaustiva de sistemas de pavimentos permeables implementados a nivel global. Su trabajo documenta reducciones de escorrentía superficial que oscilan entre 45% y 95%, así como retención de contaminantes que puede alcanzar el 90% del total presente en las aguas de lluvia. Los autores concluyen que estos sistemas constituyen estrategias clave para la adaptación climática en entornos urbanos densamente poblados.

La guía fundamental de Tennis, Leming y Akers (2004) publicaron para la Portland Cement Association la guía fundamental "Pervious Concrete Pavements", documento que ha establecido las bases metodológicas para el diseño, construcción y evaluación de pavimentos permeables a nivel mundial. Proporciona lineamientos detallados sobre dosificación de mezclas, procedimientos de colocación, técnicas de compactación y métodos de curado.

El American Concrete Institute (2010) mediante el Comité Técnico 522 publicó el "Report on Pervious Concrete" (ACI 522R-10), documento que constituye la referencia técnica más importante a nivel mundial para todo lo relacionado con el diseño y aplicación del concreto permeable. Establece

requisitos para el diseño de mezclas, procedimientos de colocación, compactación y curado, definiendo rangos óptimos para la relación agua/cemento (0.28-0.34) y contenido de vacíos (15-25%).

Deo y Neithalath (2019), en su investigación publicada en *Materials Science and Engineering*, establecieron que la resistencia estructural del concreto permeable depende fundamentalmente de su porosidad y de la estructura de sus vacíos internos. Los autores demostraron la existencia de una relación inversa entre permeabilidad y resistencia, lo que fundamenta la necesidad de optimizar el diseño de la mezcla para lograr un equilibrio adecuado según la aplicación específica.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2023) ha desarrollado el concepto de infraestructura verde urbana, que integra soluciones basadas en la naturaleza para proporcionar múltiples beneficios simultáneamente: gestión hídrica, mitigación del calor urbano y promoción de la movilidad sostenible. Sus investigaciones demuestran que los pavimentos permeables pueden reducir la escorrentía superficial entre un 70% y un 90%, y disminuir la temperatura superficial entre 4 y 9 grados Celsius, contribuyendo así de manera significativa a la resiliencia climática de las ciudades.

### **Antecedentes nacionales**

Cuicapuza (2023) desarrolló una propuesta de drenaje para ciclovías utilizando concreto permeable elaborado con agregados reciclados y adición de PET, con el objetivo de mitigar las inundaciones recurrentes en temporadas de lluvia en Piura. Su estudio destaca las ventajas ambientales de este material y su adaptabilidad a las diversas condiciones climáticas y geotécnicas del territorio peruano.

Rengifo y Valles (2019) validaron la aplicación del concreto permeable en contextos andinos a través de su investigación en Tarapoto, donde desarrollaron mezclas específicamente diseñadas para zonas de alta pluviosidad. Los resultados obtenidos evidenciaron resistencias mecánicas

adecuadas y tasas de infiltración superiores a 300 mm/h, valores que exceden los estándares internacionales recomendados para este tipo de infraestructura.

El estudio social de Rojas y Chicmana (2017) sobre ciclistas urbanos, publicaron en la Revista La Colmena de la Pontificia Universidad Católica del Perú un artículo titulado "¿Cómo se hace un ciclista urbano? El caso de Cicloaxion". promoviendo el ciclismo urbano en Lima y destacando la necesidad de contar con ciclovías seguras. Sus hallazgos indican que la existencia de infraestructura ciclista segregada reduce en 35% la percepción de riesgo entre los usuarios.

En la costa noroeste del Perú, Guizado Barrios y Curi Grados (2017) evaluaron el desempeño del concreto permeable como solución para el control de aguas pluviales en vías locales. Sus ensayos registraron tasas de infiltración de hasta 620 mm/h y reducciones de escorrentía del 85%, mientras que los análisis económicos realizados confirmaron la viabilidad financiera del material para aplicaciones de tráfico liviano.

La experiencia de Cobos (2023) presentó su tesis titulada "Infraestructura de ciclovías y desarrollo sostenible en la urbanización Retablo - Distrito de Comas - 2022", implementó pavimentos permeables en ciclovías de la urbanización Retablo, en el distrito de Comas. Los resultados fueron notables: un incremento del 38% en el uso de la bicicleta y una relación beneficio-costo de 2.1, lo que demuestra de manera contundente que este tipo de intervenciones no solo son deseables desde el punto de vista ambiental, sino también rentables desde una perspectiva social.

El estudio de movilidad en Pomabamba de Rosales (2019) desarrolló su tesis titulada "Estudio de la situación actual y propuesta de tránsito y transporte en la provincia de Pomabamba, departamento de Ancash", trabajó en un contexto diferente, el de la provincia de Pomabamba en Ancash, donde diagnosticó la situación de la movilidad y propuso ciclovías segregadas para reducir los riesgos. Sus indicadores de accesibilidad y seguridad vial resultan perfectamente aplicables a proyectos urbanos como el nuestro, y sus proyecciones de incremento en los flujos peatonales y ciclistas son alentadoras.

Las herramientas de inspección vial de Príncipe (2022) presentó su tesis "Herramientas del manual de seguridad vial para realizar las inspecciones en el sistema nacional de carreteras del Perú - SINAC", desarrollando herramientas para la inspección de seguridad vial que permiten reducir accidentes en 25%. Este enfoque resulta de gran utilidad para corredores urbanos como el Boulevard Los Andes.

La investigación en Tacna de Peralta Rodríguez y Huamolles Rengifo (2023) desarrollaron la tesis "Influencia del agregado fino y piedra chancada huso 67 en las propiedades del concreto permeable para vías urbanas, Tacna, 2022", demostrando la importancia de caracterizar adecuadamente los agregados locales, este hecho es fundamental para optimizar las mezclas y cumplir con los estándares de la Norma CE.010.

El trabajo en Tarapoto de Araujo Mego y Roman Cordova (2019) en su investigación "Diseño de un concreto permeable con agregado grueso del Río Huallaga en la ciudad de Tarapoto", trabajaron esta vez con agregados del Río Huallaga, validando el uso de las normas ACI 522R-10 y ASTM C1701 en la Amazonía peruana. Obtuvieron mezclas con resistencias a la compresión de 15.59 MPa a los 28 días y coeficientes de permeabilidad de 0.499 cm/s, demostrando que el material es viable incluso en regiones de alta pluviosidad.

### **Antecedentes locales**

El diagnóstico de Ramos (2021) desarrolló su tesis titulada "Evaluación estructural y superficial del pavimento de la Av. Lambramani con fines de diagnóstico y rehabilitación", identificando hundimientos y fisuras claramente asociados a problemas de drenaje. En su propuesta, sugiere utilizar concreto permeable en las zonas críticas para mejorar la evacuación de aguas pluviales.

Guerra Chayña y Guerra Ramos (2020) desarrollaron una propuesta de pavimento rígido permeable orientada a suelos volcánicos, aplicable a contextos como el de Juliaca. Su investigación reportó tasas de infiltración y reducciones de escorrentía notables, cuyos resultados resultan especialmente relevantes para el presente estudio dadas las similitudes geotécnicas con el área

de Arequipa. Dada la similitud de las condiciones geotécnicas, sus recomendaciones sobre dosificaciones resultan de gran valor para nuestro trabajo.

El modelado geométrico de Torres (2022) presentó su tesis titulada "Diseño geométrico de carreteras empleando software Civil-3D para optimización de transitabilidad vehicular de la ruta PU-804 del distrito de Samán, provincia de Azángaro", demostró la efectividad del software Civil 3D para diseñar carreteras que incorporan ciclovías y aceras peatonales en un proyecto desarrollado en Azángaro. Sus estándares de ancho, con 2.5 metros para ciclovías bidireccionales, y sus pendientes máximas del 8% para rampas accesibles, aseguran el cumplimiento de la normativa y constituyen una referencia valiosa para el diseño geométrico en el Boulevard Los Andes.

Las evaluaciones geotécnicas de Cabrera y Roque (2021) desarrollaron su tesis "Diseño y evaluación del afirmado estabilizado con emulsión asfáltica de la vía hacia el santuario Virgen de Chapí Charcani – Cayma", aportaron metodologías de evaluación geotécnica y determinación de la capacidad portante para vías urbanas en Arequipa, en el marco de su estudio sobre la vía hacia el santuario Virgen de Chapí en Cayma. Esta información resulta relevante para caracterizar adecuadamente el subsuelo en la zona de estudio.

La Defensoría del Pueblo (2022) emitió un informe sobre seguridad vial en espacios públicos de Arequipa que contiene un dato alarmante: el 60% de los usuarios perciben inseguridad en las vías urbanas. Esta cifra no puede ser ignorada y fundamenta la necesidad de intervenciones que mejoren la percepción de seguridad tanto para peatones como para ciclistas.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2023), a través de su Programa Nacional de Transporte Urbano Sostenible, viene promoviendo activamente la implementación de ciclovías en Arequipa como parte de una estrategia más amplia para reducir la contaminación ambiental y mejorar la salud pública, objetivos que se alinean perfectamente con los que persigue esta investigación.

## **2.2. NORMATIVA VIGENTE**

### **2.2.1. Normativa internacional**

#### **a) Comité ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete del American Concrete Institute**

Este documento constituye, sin lugar a dudas, la referencia técnica más importante a nivel mundial para todo lo relacionado con el diseño y la aplicación del concreto permeable. Establece de manera clara y detallada los requisitos que deben cumplirse para el diseño de mezclas, los procedimientos adecuados para la colocación, la compactación y el curado, así como los estándares que garantizan la calidad y el desempeño del material tanto en términos de resistencia estructural como de capacidad de infiltración.

El ACI 522R-10 establece que, para lograr un desempeño óptimo, las mezclas de concreto permeable deben presentar una relación agua-cemento entre 0.28 y 0.34, así como un contenido de vacíos que oscile entre 15% y 25%, valores que permiten un adecuado equilibrio entre la resistencia estructural y la capacidad de drenaje.

#### **b) ASTM C1701/C1701M-17: for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete**

Esta norma describe de manera precisa el método de campo estandarizado que debe emplearse para medir la tasa de infiltración del concreto permeable una vez que ha sido colocado in situ. Resulta fundamental para validar experimentalmente el desempeño hidrológico del pavimento, estableciendo el procedimiento detallado para el uso del anillo infiltrómetro, la medición precisa de los tiempos de infiltración y el cálculo de la tasa expresada en milímetros por hora.

La norma especifica que las mediciones deben realizarse utilizando un anillo de diámetro conocido, aplicando un volumen de agua perfectamente determinado y registrando cuidadosamente el tiempo que tarda el agua en infiltrarse completamente, para luego calcular la tasa de infiltración mediante la fórmula establecida.

**c) ASTM C1688/C1688M-14a: for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete**

Proporciona el procedimiento normalizado que debe seguirse para determinar la densidad y el contenido de vacíos en la mezcla fresca de concreto permeable, parámetros que resultan críticos por estar directamente relacionados con la permeabilidad final del material y con su resistencia mecánica. Este ensayo permite verificar que la mezcla elaborada cumple con los rangos de vacíos que fueron especificados en la fase de diseño.

**d) Manual de Diseño Geométrico de la AASHTO**

El Manual de Diseño Geométrico publicado por la American Association of State Highway and Transportation Officials ofrece directrices técnicas de gran valor para el diseño geométrico de vías de todo tipo. Incluye recomendaciones sobre secciones transversales, radios de curvatura, distancias de visibilidad y otros parámetros de diseño que resultan perfectamente aplicables a ciclovías y pasajes peatonales.

Para velocidades de diseño del orden de 20 kilómetros por hora, recomienda radios de curvatura mínimos de 15 metros y distancias de visibilidad de parada no inferiores a 20 metros, valores que han sido considerados en el desarrollo del presente proyecto.

**2.2.2. Normativa nacional**

**a) Norma Técnica Peruana (NTP 339.185, 2018)**

Esta norma técnica peruana establece el procedimiento para determinar la permeabilidad del concreto, resultando fundamental para la caracterización hidrológica de las mezclas de concreto permeable. Define los métodos de ensayo y los cálculos necesarios para obtener el coeficiente de permeabilidad, parámetro esencial para evaluar el desempeño hidrológico del pavimento propuesto.

**b) Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma A.120 Accesibilidad Universal en Edificaciones**

Esta norma establece los parámetros técnicos que deben cumplirse para garantizar que los espacios públicos sean verdaderamente inclusivos y accesibles para todas las personas, independientemente de sus capacidades físicas. Especifica que los anchos libres mínimos deben ser de 1.20 metros para el tránsito de personas en silla de ruedas, que las pendientes no deben superar el 8% en rampas y que las superficies deben ser antideslizantes, garantizando así la seguridad de todos los usuarios.

La Norma A.120, que forma parte del Reglamento Nacional de Edificaciones, constituye el marco normativo vigente para todo lo relacionado con accesibilidad universal en el Perú, reemplazando disposiciones anteriores y estableciendo criterios actualizados para el diseño inclusivo de espacios públicos.

**c) Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma U.010 Movilidad Urbana**

Esta norma establece de manera clara los requisitos que deben cumplirse para garantizar una movilidad urbana que sea al mismo tiempo segura, accesible y sostenible. Resulta particularmente relevante para el diseño de los pasajes peatonales y las ciclovías, ya que dicta aspectos fundamentales como: los anchos mínimos que deben tener las aceras y las ciclovías, estableciendo que para ciclovías bidireccionales el ancho mínimo debe ser de 2.5 metros, las pendientes máximas admisibles, fijando un límite del 8% para rampas accesibles, las características que deben tener las rampas destinadas a personas con discapacidad, la necesidad de segregarse adecuadamente los flujos vehiculares y no motorizados, los requisitos para la señalización tanto vertical como horizontal.

**d) Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial – Ley N° 30599 y su Reglamento**

Este dispositivo legal define los procedimientos que deben seguirse para la planeación, el diseño, la construcción y el mantenimiento de la infraestructura vial en todo el territorio nacional. Resulta particularmente relevante para los aspectos relacionados con la durabilidad y el mantenimiento del pavimento propuesto, estableciendo las responsabilidades que corresponden a los diferentes niveles de gobierno en la gestión de la infraestructura vial.

**e) Guía de Diseño de Ciclovías del Ministerio de Transportes y Comunicaciones**

Este documento técnico, elaborado por el MTC con el apoyo de expertos en movilidad sostenible, especifica los estándares que deben aplicarse en el Perú para el diseño de ciclovías. Incluye aspectos tan diversos como: Las diferentes tipologías de ciclovías que pueden implementarse, ya sean segregadas, integradas a la vereda o compartidas, las dimensiones recomendadas en función del flujo de usuarios esperado; el diseño de intersecciones y cruces para garantizar la seguridad; la señalización específica que debe emplearse para orientar a los ciclistas; y los materiales recomendados para la superficie de rodadura.

**f) Ley N° 30996 - Ley que Regula el Uso de la Bicicleta como Medio de Transporte Sostenible**

Esta ley, promulgada en el año 2019, promueve activamente la implementación de infraestructura ciclista segura y conectada en todo el territorio nacional, otorgando un marco legal sólido que justifica plenamente la necesidad de proyectos como el que aquí se propone.

Define las obligaciones que corresponden a los gobiernos locales en materia de incorporación de ciclovías en los planes de desarrollo urbano y de promoción del uso de la bicicleta como medio de transporte

sostenible, creando así las condiciones favorables para la ejecución de este tipo de intervenciones.

### **2.2.3. Normativa local**

#### **a) Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa 2016-2025**

Este importante instrumento de planificación territorial establece la visión de desarrollo urbano que se persigue para la ciudad de Arequipa. El proyecto que aquí se propone se alinea directamente con sus ejes estratégicos, particularmente con aquellos relacionados con la sostenibilidad ambiental, la movilidad urbana no motorizada y la resiliencia frente al cambio climático.

El PDM identifica específicamente la necesidad de implementar infraestructura ciclista en los principales corredores urbanos de la ciudad, lo que valida plenamente la elección del Boulevard Los Andes como área de estudio y otorga un respaldo institucional de primer nivel a la iniciativa.

Reglamento de Drenaje Pluvial Urbano de la Municipalidad de Arequipa (Actualización RNE de la Norma Técnica CE.040 “Drenaje Pluvial”. Actualizado en el año 2021, este reglamento promueve activamente la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, conocidos como SUDS, en todos los nuevos desarrollos urbanos y en los proyectos de renovación de espacios públicos existentes.

### **2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS**

A continuación, se definen conceptualmente las variables que estructuran la presente investigación. La variable independiente corresponde a los pasajes peatonales y ciclovías, mientras que la variable dependiente corresponde al pavimento rígido con concreto permeable.

#### **2.3.1. Pasajes peatonales y ciclovías**

**Pasajes peatonales:** Constituyen una infraestructura urbana especialmente diseñada para la movilidad no motorizada, comprendiendo espacios claramente

segregados destinados al tránsito de personas a pie. Según lo señalado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2021), estos elementos constituyen "componentes esenciales del sistema de movilidad sostenible, requiriendo diseños que prioricen seguridad, comodidad y accesibilidad universal" (p. 25). Su implementación se rige por lo dispuesto en la Norma U.010 Movilidad Urbana del Reglamento Nacional de Edificaciones (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021b), que establece los parámetros técnicos que deben cumplirse en cuanto a anchos mínimos, pendientes máximas admisibles y características superficiales.

**Ciclovías:** Son vías exclusivas o preferenciales destinadas específicamente a la circulación de bicicletas, pudiendo ser de tipo unidireccional o bidireccional, y pueden estar segregadas físicamente de la calzada vehicular o integradas a ella pero claramente diferenciadas mediante señalización. La Guía de Diseño de Ciclovías del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2021) establece con claridad los anchos mínimos que deben tener: 1.50 metros para vías unidireccionales y 2.50 metros para aquellas de tipo bidireccional. También fija las pendientes máximas admisibles, que no deben superar el 8%, y los radios de curvatura mínimos, que no deben ser inferiores a 15 metros.

**Funcionalidad y seguridad vial:** La funcionalidad vial se entiende como la capacidad que tiene una determinada infraestructura para permitir que los desplazamientos se realicen de manera eficiente y fluida. Esta característica puede medirse mediante los niveles de servicio, conocidos como LOS por sus siglas en inglés, que van desde la categoría A, que representa un flujo completamente libre, hasta la categoría F, que indica condiciones de congestión severa (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018). La evaluación de estos niveles de servicio se realiza siguiendo los procedimientos establecidos en el Manual de Carreteras del MTC y en el Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2016). La funcionalidad óptima se alcanza cuando se logran niveles de servicio A o B, que garantizan un flujo sin restricciones y condiciones adecuadas tanto para peatones como para ciclistas.

La seguridad vial comprende el conjunto de características que debe reunir el diseño de una vía para minimizar los riesgos de accidentes y garantizar la integridad física de todos los usuarios (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016). Se evalúa mediante diversos indicadores, entre los que destacan:

- La señalización, tanto vertical como horizontal, que debe cumplir con lo establecido en el Reglamento Nacional de Tránsito (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).
- Las condiciones de visibilidad, que deben garantizar distancias de parada y de rebase adecuadas al tipo de vía y a la velocidad de diseño.
- La iluminación, que debe proporcionar niveles mínimos de 20 lux en las superficies de circulación.
- Los elementos de protección física, como bolardos y separadores, que contribuyen a segregar los diferentes flujos de tránsito.

**Accesibilidad universal:** La accesibilidad universal es una característica fundamental del diseño que garantiza que todos los usuarios, incluyendo aquellos con movilidad reducida, puedan utilizar la infraestructura de manera autónoma, segura y sin encontrar barreras que limiten su desplazamiento. Este concepto, recogido en la Norma A.120 del Reglamento Nacional de Edificaciones (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021a), constituye un principio rector para el diseño de espacios públicos inclusivos.

Se evalúa mediante diversos parámetros, entre los que destacan:

- La geometría vial, que debe garantizar anchos libres que permitan el tránsito de personas en silla de ruedas (mínimo 1.20 metros), pendientes que no superen el 8% y superficies antideslizantes con un coeficiente de fricción adecuado.
- La presencia de elementos como rampas, pasamanos y señalización táctil que faciliten la orientación y el desplazamiento de personas con discapacidad visual.
- La conectividad vial, entendida como el grado de integración de la infraestructura con la red de movilidad urbana circundante, incluyendo la distancia a los paraderos de transporte público.

### 2.3.2. Pavimento rígido con concreto permeable

Se trata de un sistema de pavimentación que se caracteriza por poseer una estructura porosa con vacíos interconectados que ocupan entre el 18% y el 35% del volumen total del material, permitiendo así la infiltración del agua de lluvia hacia las capas inferiores y, finalmente, hacia el subsuelo (ACI Committee 522, 2010). Su diseño y construcción se rigen por las normas técnicas peruanas aplicables, particularmente la (NTP 339.185, 2018), (Instituto Nacional de Calidad, 2018) para la determinación de la permeabilidad, y por las recomendaciones internacionales contenidas en documentos como el ACI 522R-10. El material se concibe como un sistema estructuralmente competente que integra la gestión hídrica mediante una permeabilidad controlada.

#### **Propiedades mecánicas**

*Resistencia a la compresión:* La resistencia a la compresión, representada comúnmente como  $f_c$ , es la capacidad que tiene el material para soportar cargas de tipo axial sin experimentar fallas o deformaciones excesivas. Se determina siguiendo los procedimientos establecidos en la norma (NTP 339.034, 2013), (Instituto Nacional de Calidad, 2020), correspondiente a ASTM C39. Para aplicaciones en ciclovías y pasajes peatonales, se requieren resistencias que garanticen un comportamiento estructural adecuado bajo las cargas esperadas. En la presente investigación se ha establecido como objetivo alcanzar una resistencia  $f_c$  igual o superior a 25 MPa, con el fin de garantizar un margen de seguridad adicional que permita absorber eventuales sobrecargas o situaciones imprevistas.

*Resistencia a la flexión:* La resistencia a la flexión, también conocida como módulo de rotura, es la capacidad del material para resistir esfuerzos de flexión sin llegar a la rotura. Se determina mediante ensayos realizados sobre vigas de dimensiones normalizadas, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma NTP 339.078 (Instituto Nacional de Calidad, 2020), correspondiente a ASTM C78. Este parámetro resulta particularmente crítico para el diseño estructural de pavimentos, ya que el esfuerzo de flexión es el predominante en

las losas sometidas a cargas puntuales, como las que generan las ruedas de los vehículos o incluso el paso de peatones y ciclistas.

### **Propiedades hidrológicas**

*Capacidad de infiltración:* La capacidad de infiltración, también denominada tasa de infiltración, es la velocidad a la que el agua puede atravesar el material permeable. Se mide in situ siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM C1701 (ASTM International, 2017), que guarda correspondencia con la (NTP 339.185, 2018) para la determinación de la permeabilidad del concreto. La Municipalidad de Arequipa (2021) exige, a través del Reglamento de Drenaje Pluvial Urbano, que las superficies permeables instaladas en vías urbanas alcancen una tasa de infiltración mínima de 100 milímetros por hora. En la presente investigación se ha establecido como objetivo alcanzar una tasa igual o superior a 300 milímetros por hora, superando ampliamente el mínimo exigido y garantizando un excelente comportamiento hidrológico.

*Coefficiente de permeabilidad:* El coeficiente de permeabilidad es un parámetro intrínseco del material que define su capacidad para transmitir fluidos a través de su estructura porosa. Está directamente relacionado con la porosidad efectiva y con el grado de conectividad que existe entre los vacíos que conforman la red porosa del material. Su determinación se realiza siguiendo los procedimientos establecidos en la NTP 339.185 (Instituto Nacional de Calidad, 2018).

### **Sostenibilidad urbana**

La sostenibilidad urbana se entiende como la integración multidimensional de criterios de tipo ambiental, social y económico en todos los procesos de desarrollo urbano. En el contexto específico de esta investigación, se evalúa a través de:

- El drenaje pluvial sostenible, que debe cumplir con lo establecido en el Reglamento de Drenaje Pluvial Urbano y que se mide mediante la reducción de la escorrentía superficial y la capacidad de infiltración del pavimento.
- La seguridad y el confort de los usuarios, evaluados según los parámetros de las normas U.010 y A.120 del Reglamento Nacional de Edificaciones.

- La sostenibilidad ambiental, entendida según lo dispuesto en la Ley N° 30754, Ley Marco sobre Cambio Climático (Ministerio del Ambiente, 2018).  
El Ministerio del Ambiente (2018) establece en su normativa que "las infraestructuras urbanas deben contribuir a la reducción de vulnerabilidades climáticas y emisiones de GEI" (Art. 12), un principio que orienta y da sentido a la presente investigación.

### **2.3.3. Teorías fundamentales que sustentan la investigación**

#### **Teoría de flujo a través de medios porosos**

El comportamiento hidrológico del concreto permeable se explica a partir de la Teoría de Flujo en Medios Porosos. Bear (2018) señala que la ecuación de Darcy constituye el fundamento matemático que describe el movimiento del agua a través de materiales porosos, estableciendo que la conductividad hidráulica está determinada por la porosidad y la permeabilidad intrínseca del medio.

Esta teoría proporciona la base científica que explica el desempeño hidrológico del concreto permeable como sistema de drenaje urbano sostenible, permitiendo predecir su comportamiento y optimizar su diseño en función de las necesidades específicas de cada proyecto.

#### **Teoría del comportamiento mecánico de materiales porosos**

De acuerdo con Deo y Neithalath (2019), la capacidad portante del concreto permeable está condicionada por su porosidad y la configuración de sus vacíos internos. Los autores identifican una relación inversa entre la permeabilidad y la resistencia mecánica, lo que implica que el diseño de la mezcla debe ser cuidadosamente optimizado para alcanzar un balance apropiado según el uso previsto.

Los autores explican que "la resistencia a compresión en concretos permeables varía entre 3 y 28 MPa, con relación inversa entre permeabilidad y resistencia" (p. 225), un rango que ha sido considerado en el establecimiento de los objetivos de la presente investigación.

**Teoría de la movilidad sostenible**

Litman (2022) sostiene que la planificación vial debería privilegiar los desplazamientos no motorizados mediante la creación de entornos seguros y accesibles que fomenten el caminar y el uso de la bicicleta. Su análisis evidencia que las inversiones en infraestructura para peatones y ciclistas generan retornos sociales que oscilan entre 3 y 10 veces su costo, derivados de beneficios en salud pública, menor congestión vehicular y reducción de emisiones contaminantes.

## CAPÍTULO III:

### METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA

##### 3.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicado, pues utiliza conocimientos teóricos existentes sobre pavimentos permeables, movilidad sostenible y drenaje urbano para resolver un problema concreto en un contexto real: la mejora de la infraestructura peatonal y ciclista del Boulevard Los Andes. Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), la investigación aplicada se caracteriza por su interés en la aplicación de los conocimientos teóricos a determinada situación concreta y las consecuencias prácticas derivadas.

**Enfoque de investigación:** Se adopta un enfoque cuantitativo, fundamentado en la medición objetiva de propiedades mecánicas (resistencia a compresión y flexión), hidrológicas (permeabilidad), y análisis estadístico de los resultados. Este enfoque permite establecer relaciones cuantitativas entre variables y generalizar los hallazgos a contextos similares.

**Diseño metodológico de la investigación:** Dado que la investigación aborda tres objetivos específicos de naturaleza diferente, se ha adoptado un diseño metodológico mixto secuencial, compuesto por dos componentes diferenciados:

**a) Componente experimental (para el Objetivo 1: parámetros de diseño):**

Para la determinación de los parámetros de diseño del concreto permeable, se empleó un diseño experimental de tipo comparativo.

**b) Componente proyectivo y de modelado numérico (para los Objetivos 2 y 3):** Para el desarrollo del diseño geométrico y estructural de los pasajes

peatonales y ciclovías (Objetivo 2), se empleó un diseño proyectivo asistido por software, Para la evaluación del desempeño hidrológico del pavimento permeable (Objetivo 3), se utilizó un diseño de simulación numérica comparativa (pre-post) mediante Software PCSWMM 2025.

### 3.1.2. Nivel de investigación

El estudio se sitúa en un nivel aplicativo o de desarrollo tecnológico, dado que su propósito fundamental es generar un producto técnico validado (mezcla óptima de concreto permeable, diseño geométrico, especificaciones constructivas) que pueda ser implementado directamente. Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), este nivel de investigación implica la utilización de conocimientos existentes para desarrollar soluciones prácticas, superando la mera descripción o explicación de fenómenos.

### 3.1.3. Justificación del Enfoque aplicado

Se adopta un enfoque cuantitativo, fundamentado en la medición objetiva de propiedades mecánicas (resistencia a compresión y flexión), hidrológicas (permeabilidad), con análisis estadístico de los resultados. Este enfoque permite establecer relaciones entre variables y generalizar los hallazgos a contextos similares.

El diseño metodológico mixto (experimental + proyectivo con modelado numérico) se justifica por las siguientes razones:

- **El componente experimental (Objetivo 1):** Se justifica porque no existía una mezcla de concreto permeable validada con materiales de Arequipa (cemento YURA MAX, agregados Cantera Chiguata). Era necesario generarla experimentalmente, ya que no se pudo usar una mezcla existente porque no la había.
- **El componente proyectivo con modelado (Objetivo 2):** El diseño geométrico requiere precisión topográfica y cumplimiento normativo, lo que se logra con software especializado (Civil 3D).
- **El componente simulación numérica (Objetivo 3):** El impacto hidrológico del pavimento permeable debe evaluarse antes de la construcción.

La simulación con PCSWMM permite modelar escenarios pre-post sin intervención física.

### **Ámbito de estudio**

El estudio se desarrolla en el Boulevard Los Andes, ubicado en el distrito de Alto Selva Alegre, provincia y departamento de Arequipa, específicamente en un tramo de 140 metros lineales comprendido entre las avenidas Argentina y España. Las coordenadas UTM aproximadas del área son: 229,850 m E; 8'189,750 m S, a una altitud de 2,450 msnm.

### **Figura 1**

*Ubicación del área de estudio - Boulevard Los Andes*



*Nota: Plano con la ubicación exacta del Boulevard Los Andes en el distrito de Alto Selva Alegre, Arequipa.*

### **Población y muestra**

**Población:** Longitud total de 5 cuadras del Boulevard Los Andes, que suman 372 metros lineales, comprendidas entre la Av. Arequipa y la Av. Manco Capac.

**Muestra:** Longitud de 2 cuadras (140 metros lineales), seleccionadas mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, correspondientes a los tramos entre Av. Argentina y Av. España. Esta selección responde a la representatividad de las condiciones problemáticas y a la factibilidad operativa para el desarrollo de la investigación.

### **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para la recolección de información se emplearon diversas técnicas e instrumentos, seleccionados en función de la naturaleza de los datos requeridos en cada etapa de la investigación.

Mediante el análisis documental, se utilizaron fichas documentales para revisar normativas nacionales e internacionales, antecedentes de estudios similares y planos existentes del área de intervención, lo que permitió establecer el marco normativo y contextual del proyecto.

La técnica de observación directa se aplicó a través de fichas de observación y registro fotográfico, con el propósito de documentar el estado actual del pavimento, identificar zonas deterioradas, puntos críticos de acumulación de agua y deficiencias en la infraestructura peatonal y ciclista existente.

La medición directa en campo se determinó mediante equipos topográficos especializados, incluyendo estación total, GPS diferencial y nivel automático, con los cuales se levantaron 1,248 puntos georreferenciados que permitieron generar el modelo digital del terreno y los planos base para el diseño geométrico.

Finalmente, los ensayos de laboratorio se ejecutaron siguiendo formatos de cálculo normalizados según las normas ASTM y NTP correspondientes, con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas (resistencia a compresión y flexión) e hidrológicas (permeabilidad) de las mezclas de concreto permeable evaluadas. Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales CONSLABERTT EIRL, bajo condiciones controladas y con equipos calibrados, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

### **3.2. DISEÑO DEL PROYECTO**

El desarrollo de la investigación siguió un diseño metodológico estructurado en **cinco etapas secuenciales**, ejecutadas entre diciembre de 2025 y marzo de 2026. A continuación, se describe brevemente cada etapa, especificando los

procedimientos metodológicos realizados, sin incluir los resultados obtenidos, los cuales se presentan en el Capítulo IV.

### **3.2.1. Etapas del proyecto**

#### **- Etapa 1: Estudio Documental y Marco de Referencia**

Objetivo: Establecer la base teórica, normativa y contextual que sustenta la investigación.

#### **Actividades desarrolladas:**

##### **1. Revisión de normativas internacionales:**

- Se analizó el documento ACI 522R-10 del American Concrete Institute, extrayendo los criterios fundamentales para el diseño de mezclas de concreto permeable, particularmente los rangos de relación agua/cemento (0.28-0.34) y contenido de vacíos (15-25%).
- Se estudiaron las normas ASTM C1701 para medición de permeabilidad y ASTM C1688 para densidad y contenido de vacíos. Se consultó el Manual de Diseño Geométrico de la AASHTO para establecer criterios de radios de curvatura y distancias de visibilidad.

##### **2. Revisión de normativas nacionales:**

- Se examinó la (NTP 339.185, 2018) para la determinación de la permeabilidad del concreto. Se analizaron las normas del Reglamento Nacional de Edificaciones A.120 (Accesibilidad Universal) y U.010 (Movilidad Urbana).
- Se estudió la Ley N° 30996 que regula el uso de la bicicleta como medio de transporte sostenible. Se consultó la Guía de Diseño de Ciclovías del MTC (2021) para establecer anchos mínimos y criterios de diseño.

##### **3. Revisión de normativas locales:**

- Se analizó el Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa 2016-2025.

##### **4. Análisis de antecedentes:**

- Se revisaron 25 artículos científicos internacionales, se analizaron 12 tesis nacionales, se estudiaron 8 tesis locales de Arequipa.

##### **5. Recopilación de información técnica del área de estudio:**

- Se obtuvieron planos catastrales de la Municipalidad de Alto Selva Alegre, se determinó un levantamiento topográfico preliminar y se tomaron 10 fotografías de puntos críticos.

### **6. Definición de variables e indicadores**

La variable independiente corresponde a los pasajes peatonales y ciclovías, la cual se analizó desde dos dimensiones principales. En primer lugar, la funcionalidad y seguridad vial fue evaluada mediante los niveles de servicio (LOS) y la señalización vial existente y proyectada. En segundo lugar, la accesibilidad vial se midió a través de la geometría vial (anchos, pendientes, radios de curvatura) y la conectividad vial con la red de movilidad circundante.

La variable dependiente está representada por el pavimento rígido con concreto permeable, y fue analizada considerando tres dimensiones fundamentales. La primera de ellas corresponde a las propiedades mecánicas, cuyos indicadores fueron la resistencia a la compresión ( $f_c$ ) y la resistencia a la flexión (módulo de rotura, MR), determinadas mediante ensayos normalizados. La segunda dimensión abarca las propiedades hidrológicas, medidas a través de la capacidad de infiltración (expresada en mm/h) y el coeficiente de permeabilidad (en cm/s), ambos obtenidos siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C1701. Finalmente, la sostenibilidad urbana se evaluó mediante indicadores de drenaje pluvial (reducción de escorrentía superficial), seguridad y confort de los usuarios (percepción de seguridad, accesibilidad universal) y sostenibilidad ambiental (mitigación del efecto isla de calor, reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>).

Esta estructura de variables, dimensiones e indicadores permitió articular coherentemente los objetivos de la investigación con las técnicas e instrumentos de recolección de datos, asegurando que cada aspecto relevante del problema de estudio fuera adecuadamente abordado y medido.

#### **- Etapa 2: Diseño de Mezcla de Concreto Permeable**

Objetivo: Se formular y validar en laboratorio una mezcla óptima de concreto permeable que cumplió con los estándares de resistencia ( $f_c \geq 25$  MPa) y permeabilidad ( $k \geq 300$  mm/h) para tráfico ligero.

**Materiales utilizados y origen:**

Los Los componentes fueron seleccionados por su accesibilidad en la región de Arequipa y su adecuación técnica. Se utilizaron cemento YURA MAX (Cementos Yura S.A.), agregado grueso de 1/2" procedente de la Cantera Chiguata, agua potable apta para concreto y aditivo plastificante Tipo A (ASTM C494) para las mezclas experimentales.

**Caracterización del agregado grueso:** Se realizaron ensayos de granulometría (NTP 400.012), pesos unitarios suelto y compactado (NTP 400.017), peso específico y absorción (NTP 400.022), y contenido de humedad (NTP 339.185), cuyos resultados se presentan en la Tabla 11 y Figura 2 (Capítulo IV).

**Criterios de diseño adoptados:** Basados en las recomendaciones del ACI 522R-10 y experiencias previas documentadas, se establecieron los criterios de diseño presentados en la Tabla 12 (Capítulo IV).

**Diseño de mezclas experimentales:** Se diseñaron tres tipos de mezcla para evaluar el efecto del aditivo plastificante: Mezcla Patrón MP-01 (sin aditivo,  $a/c=0.34$ , cemento  $350 \text{ kg/m}^3$ ), Mezcla Diseño 1 MD-01 (con aditivo 0.6%,  $a/c=0.30$ , cemento  $380 \text{ kg/m}^3$ ) y Mezcla Diseño 2 MD-02 (con aditivo 1.0%,  $a/c=0.27$ , cemento  $400 \text{ kg/m}^3$ ). Las dosificaciones se detallan en la Tabla 13 (Capítulo IV).

**Programa de ensayos y número de especímenes:** Se elaboraron 18 probetas para compresión (Tabla 14), 12 vigas para flexión (Tabla 15) y 6 losas para permeabilidad (Tabla 16). El resumen total de especímenes se presenta en la Tabla 17 (Capítulo IV).

**Procedimiento experimental:** Se determinó la caracterización de agregados (Fase 1), la elaboración de mezclas y especímenes en enero-febrero 2026 (Fase 2), y los ensayos de laboratorio a los 7, 14 y 28 días (Fase 3), siguiendo las normas NTP 339.034/ASTM C39 para compresión, NTP 339.078/ASTM C78 para flexión, y ASTM C1701 para permeabilidad.

- **Etapa 3: Modelado Geométrico y Estructural**

Objetivo: Elaborar el diseño detallado de la sección transversal y longitudinal de veredas y ciclovías, determinando los espesores necesarios del pavimento.

**Levantamiento topográfico:** En enero de 2026 con equipos especializados (estación total Leica TS06, GPS diferencial Trimble R8s, nivel automático Topcon AT-B4). Se levantaron 1,248 puntos georreferenciados en los 140 metros lineales del tramo de estudio.

**Criterios de diseño geométrico adoptados:** Se establecieron los criterios de diseño geométrico basados en la Guía de Diseño de Ciclovías del MTC (2021) y el Reglamento Nacional de Edificaciones (Normas U.010 y A.120), cuyos parámetros se presentan en la Tabla 26 (Capítulo IV).

**Diseño estructural del pavimento:** Se aplicó el método AASHTO 93 para pavimentos rígidos, considerando los parámetros de la Tabla 27 (Capítulo IV) y las propiedades de la mezcla MP-01 determinadas experimentalmente.

**Diseño de sub-base granular drenante:** Se definieron las características del material drenante según la Tabla 28 (Capítulo IV).

**Verificación de capacidad de infiltración del sistema:** Se determinó el cálculo del área permeable efectiva considerando la permeabilidad del concreto y la sección transversal definida.

**Planos generados:** Se elaboraron 06 planos de diseño (P-01 a P-06) con las características detalladas en la Tabla 30 (Capítulo IV).

- **Etapa 4: Simulación Hidrológica**

Objetivo: Evaluar el desempeño hidrológico del pavimento permeable diseñado.

**Obtención de datos de precipitación - SENAMHI:** Se utilizó la herramienta oficial del SENAMHI para la ubicación del proyecto, obteniendo las intensidades de precipitación para diferentes períodos de retorno (Tabla 32, Capítulo IV).

**Configuración del modelo en PCSWMM 2025:** Se utilizó el software PCSWMM 2025 (versión académica), basado en el motor EPA SWMM, para

la modelación hidrológica. Se delimitaron 8 subcuencas (Tabla 34, Capítulo IV) y se definieron los parámetros de infiltración según el modelo Horton.

**Modelación del pavimento permeable (LID):** Se definieron los parámetros LID para el pavimento permeable MP-01 (Tabla 36, Capítulo IV) y para los adoquines (Tabla 37, Capítulo IV).

**Simulación de escenarios:** Se modelaron dos escenarios: actual (sin pavimento permeable) y proyectado (con pavimento permeable MP-01), para períodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años.

#### - **Etapas 5: Propuesta Final y Recomendaciones**

**Objetivo:** Integrar todos los productos generados en las etapas previas para conformar una propuesta final técnicamente fundamentada y elaborar las recomendaciones correspondientes.

##### **Actividades desarrolladas:**

- Integración de resultados de etapas previas: Se consolidaron sistemáticamente los productos generados en las cuatro etapas anteriores (marco normativo, ficha técnica de mezcla MP-01, planos de diseño, resultados de simulación hidrológica).
- Elaboración de la propuesta final de intervención: Se redactó la memoria descriptiva, las especificaciones técnicas constructivas y el protocolo de operación y mantenimiento.
- Elaboración de conclusiones y recomendaciones: Se redactaron las conclusiones finales estructuradas en función de los objetivos específicos, y se formularon recomendaciones dirigidas a diferentes actores.
- Validación de la propuesta: Se verificó el cumplimiento normativo, la verificación por fatiga y la simulación hidrológica.

#### **3.2.2. Herramientas y software utilizados**

Para el desarrollo de la investigación se emplearon diversas herramientas informáticas y equipos de laboratorio y campo, seleccionados en función de los requerimientos específicos de cada etapa del proyecto.

### **Software de diseño y modelado**

Se utilizó AutoCAD Civil 3D 2025 para el modelado geométrico bidimensional y tridimensional, PCSWMM 2025 para la modelación hidrológica, ArcGIS 10.8 para el procesamiento de modelos digitales de elevación y delimitación de subcuencas, AASHTO Ware Pavement ME para el diseño estructural de pavimentos, y Microsoft Excel 365 y Project 2021 para el procesamiento de datos y elaboración de cronogramas.

### **Equipos de laboratorio y campo**

Para el levantamiento topográfico se empleó estación total Leica TS06, GPS diferencial Trimble R8s y nivel automático Topcon AT-B4. Para los ensayos de laboratorio se utilizó máquina de compresión universal ELE ADR 2000, máquina universal de ensayos Controls 50-C46H2, permeámetro ASTM C1701, balanza electrónica, mezcladora de concreto tipo trompo, tamices normalizados y cronómetro digital.

## **3.3. EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD**

La evaluación técnica y de factibilidad se presenta en función de los tres objetivos específicos que guían la investigación.

### **3.3.1. Diseño de pavimentos rígidos con concreto permeable**

El primer objetivo consistió en determinar los parámetros de diseño de la mezcla de concreto permeable, incluyendo sus propiedades mecánicas (resistencia a compresión y flexión) e hidrológicas (permeabilidad).

#### **a) Factibilidad técnica**

La determinación de los parámetros de diseño demostró ser técnicamente factible al basarse en metodologías normalizadas internacionalmente:

- Normas aplicadas: Se emplearon las normas ASTM C1701 para medición de permeabilidad, ASTM C39 y C78 para ensayos de resistencia, y ACI 522R-10 como marco referencial para el diseño de mezclas.
- Materiales locales: Se utilizaron cemento YURA MAX y agregados de la Cantera Chiguata (Arequipa), demostrando que es posible obtener un concreto permeable de alto desempeño con insumos disponibles regionalmente.

- Resultados experimentales: La mezcla óptima MP-01 alcanzó los siguientes valores:

- Resistencia a compresión ( $f'c$ ): 26.17 MPa (superando el objetivo de  $\geq 25$  Mpa)
- Resistencia a flexión (MR): 3.78 Mpa (superando el objetivo de  $\geq 3.5$  Mpa).
- Permeabilidad (k): 311.9 mm/h (superando ampliamente el objetivo de  $\geq 300$  mm/h)

Estos resultados confirman que es técnicamente viable producir un concreto permeable que cumple simultáneamente con requisitos estructurales e hidrológicos para aplicaciones de tráfico liviano.

#### **b) Factibilidad operativa**

Disponibilidad de materiales: El cemento YURA MAX es producido localmente en Arequipa (Planta Yura), y los agregados de la Cantera Chiguata son de fácil acceso, lo que garantiza la reproducibilidad de la mezcla.

Equipos de laboratorio: Los ensayos se realizaron en el Laboratorio CONSLABERTT EIRL, equipado con maquinaria especializada (máquina de compresión universal ELE ADR 2000, máquina de flexión Controls 50-C46H2, permeámetro ASTM C1701), demostrando que la caracterización de materiales es operativamente factible en la región.

Personal calificado: Se contó con la participación de ingenieros especialistas y técnicos de laboratorio con experiencia en ensayos de concreto.

#### **c) Factibilidad económica**

El costo de la fase experimental para la determinación de parámetros de diseño (ensayos de laboratorio, materiales y emisión de certificados) está incluido dentro del presupuesto total de investigación S/ 11,390.00. Este costo es significativamente inferior al beneficio de contar con una mezcla validada que garantiza el desempeño a largo plazo de la infraestructura.

#### **d) Factibilidad ambiental**

La mezcla MP-01, al prescindir de aditivos químicos (plastificantes), reduce el impacto ambiental asociado a la producción de insumos especializados.

Asimismo, el uso de agregados de cantera local disminuye la huella de carbono asociada al transporte de materiales.

#### **e) Factibilidad social**

La validación técnica de la mezcla MP-01, que será empleada en veredas y ciclovías, responde directamente a las necesidades identificadas en situ.

### **3.3.2. Análisis de funcionalidad, seguridad y accesibilidad universal**

El segundo objetivo se centró en determinar cómo los criterios de funcionalidad, seguridad vial y accesibilidad universal influyen en el diseño geométrico y estructural de los pasajes peatonales y ciclovías.

#### **a) Factibilidad técnica**

Cumplimiento normativo: El diseño propuesto se alinea estrictamente con:

- RNE Norma U.010 (Movilidad Urbana): veredas de 2.00 m de ancho (mínimo exigido), pendientes longitudinales  $\leq 8\%$ , pendientes transversales  $\leq 2\%$ .
- Guía de Diseño de Ciclovías del MTC (2021): ciclovías unidireccionales de 1.50 m a cada lado (total 3.00 m).
- RNE Norma A.120 (Accesibilidad Universal): 14 rampas accesibles de 1.20 m de ancho con pendiente  $\leq 8\%$ , superficies antideslizantes.
- Método AASHTO 93: verificación estructural con espesor de losa de 15 cm y relación  $\sigma_{\text{máx}}/MR = 0.365 < 0.45$ , garantizando vida útil superior a 20 años.

Modelado geométrico: El uso de software especializado (AutoCAD Civil 3D 2025) permitió generar 06 planos de diseño (planta general, perfiles longitudinales, secciones transversales, detalles de rampas y señalización) con precisión topográfica de  $\pm 2$  cm en planta y  $\pm 1$  cm en niveles.

#### **b) Factibilidad operativa**

Escala de intervención: Los 140 metros lineales del tramo seleccionado (entre Av. Argentina y Av. España) constituyen una escala manejable que permite la implementación por etapas sin afectar significativamente la circulación vehicular en la zona.

Técnicas constructivas: Se emplearán técnicas convencionales (demolición mecánica, movimiento de tierras con retroexcavadora, colocación

de concreto con plancha vibratoria), adaptadas para garantizar la permeabilidad del concreto (compactación liviana, curado con cubierta plástica por 7 días).

Señalización: La propuesta incluye 12 letreros verticales y 85 m<sup>2</sup> de señalización horizontal termoplástica, elementos de fácil adquisición e instalación en el mercado local.

### **c) Factibilidad ambiental**

El diseño prioriza la movilidad activa, destinando el 68% del ancho total de la vía (7.00 m de 10.30 m) a modos no motorizados (peatones y ciclistas). Esto contribuye a la reducción de emisiones de GEI al fomentar el desplazamiento sostenible. Adicionalmente, las pendientes  $\leq 8\%$  y las rampas accesibles garantizan que el espacio sea utilizable por toda la población, independientemente de sus capacidades físicas.

### **3.3.3. Análisis de indicadores de sostenibilidad urbana**

El tercer objetivo buscó mejorar los indicadores de sostenibilidad urbana mediante la implementación del pavimento de concreto permeable, evaluando su desempeño hidrológico, aceptación social y rentabilidad económica.

#### **a) Factibilidad técnica**

Simulación hidrológica: Utilizando PCSWMM 2025 (basado en EPA SWMM), se modeló el impacto de la intervención en la cuenca de 18.50 ha, obteniendo:

- Reducción de escorrentía superficial: entre 20.6% y 32.4% para lluvias de 2 a 25 años.
- Reducción de caudal pico: entre 20.8% y 32.8%.
- Eliminación de reboses en nodos para lluvias de hasta 10 años (de 3 a 0).
- Capacidad de infiltración del sistema: 4.6 veces superior al caudal de diseño (317.2 m<sup>3</sup>/h vs 68.9 m<sup>3</sup>/h).

#### **b) Factibilidad operativa**

Mantenimiento programado: Se ha definido un protocolo de operación y mantenimiento que incluye:

- Inspección visual mensual (Municipalidad)
- Medición de permeabilidad trimestral (ASTM C1701)

- Barrido mecánico aspirado semestral
- Hidrolavado a baja presión anual
- Aspiración industrial profunda bianual

Este protocolo garantiza la funcionalidad hidrológica y estructural a largo plazo.

### c) Factibilidad ambiental

Los beneficios ambientales cuantificados son:

- Área permeable adicional: 1,017 m<sup>2</sup>
- Volumen infiltrado anual estimado: 12,850 m<sup>3</sup>/año
- Recarga de acuíferos por evento significativo: +301 m<sup>3</sup>
- Reducción estimada de temperatura superficial: 4-5°C (mitigación de isla de calor)
- Reducción estimada de emisiones de CO<sub>2</sub>: 12.8 t/año

El proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y 13 (Acción por el clima).

#### 3.3.4. Evaluación del nivel de servicio (LOS) peatonal y ciclista

Complementariamente a la evaluación hidrológica y estructural presentada en las secciones anteriores, se realizó una evaluación del nivel de servicio (Level of Service - LOS) para peatones y ciclistas, con el objetivo de cuantificar la mejora en la calidad de la movilidad activa generada por la intervención propuesta.

##### a) Metodología para la evaluación peatonal

Se aplicó el método basado en densidad de flujo establecido en el *Highway Capacity Manual* (HCM 2016, Capítulo 23 - Peatones). La densidad de flujo peatonal se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D = (v_p \times f_{peq}) / W_{efectiva}$$

Donde:

- D = densidad de flujo peatonal (peatones/min/m)
- v<sub>p</sub> = flujo peatonal en la hora pico (peatones/h)
- f<sub>peq</sub> = factor de ajuste por presencia de niños, adultos mayores o personas con movilidad reducida (adimensional)

- $W_{\text{efectiva}} = \text{ancho efectivo de vereda (m)}$

Los datos de entrada fueron obtenidos de los aforos realizados en febrero de 2026:

- Flujo peatonal en hora pico: 120 peatones/h
- Ancho efectivo de vereda proyectada: 2.00 m
- Factor de ajuste: 1.0 (sin obstáculos en la vía)

Aplicando la fórmula:

$$D = (120 \times 1.0) / 2.00 = 60 \text{ peatones/h/m} = 1.0 \text{ peatones/min/m}$$

Según la tabla de niveles de servicio del HCM 2016 para vías peatonales:

- LOS A (flujo libre): densidad  $\leq 0.5$  peatones/min/m
- LOS B (flujo con leve restricción): densidad 0.5 - 1.0 peatones/min/m
- LOS C (flujo restringido): densidad 1.0 - 1.5 peatones/min/m

El valor obtenido (1.0 peatones/min/m) se encuentra en el límite superior del Nivel de Servicio B, lo que indica condiciones adecuadas de circulación peatonal con leves restricciones en horas pico.

### **b) Metodología para la evaluación ciclista**

Para la evaluación del nivel de servicio para ciclistas, se aplicó el Índice de Condición Ciclista (Bicycle Level of Service - BLOS) desarrollado por la Federal Highway Administration (FHWA, 2019). Este método considera múltiples variables que afectan la percepción de seguridad y comodidad de los ciclistas.

**Tabla 1**

*Los parámetros evaluados y sus puntuaciones fueron:*

<b>Variable</b>	<b>Condición en el diseño propuesto</b>	<b>Puntaje (1-5)</b>
Ancho de ciclo vía	1.50 m (unidireccional)	2 (bueno)
Separación del tráfico vehicular	Segregación física con bolardos	1 (excelente)
Velocidad de diseño	20 km/h	2 (bueno)
Volumen vehicular calzada adyacente	Bajo (tráfico local)	2 (bueno)
Estado de la superficie	Concreto permeable, superficie uniforme	1 (excelente)
Señalización	Completa (vertical + horizontal)	2 (bueno)

*Nota: El puntaje ponderado total obtenido fue de 1.8, lo que según la escala BLOS corresponde a un Nivel de Servicio B (condición buena). Esto significa que ciclistas habituales y ocasionales se sienten cómodos utilizando la infraestructura, y solo ciclistas principiantes podrían presentar alguna leve incomodidad.*

### **c) Evaluación de la relación volumen/capacidad (V/C)**

Si bien el enfoque principal de la investigación es la movilidad activa (peatones y ciclistas), se realizó una evaluación preliminar de la relación V/C para la calzada vehicular, considerando:

- Ancho de calzada proyectada: 3.30 m (un carril por sentido)
- Capacidad teórica para vía local (MTC, 2018): 400 vehículos/hora/carril
- Volumen vehicular aforado en hora pico: 85 vehículos/hora

$$V/C = 85 / 400 = 0.2125 \text{ (21.25\%)}$$

Este valor indica que la calzada operará con Nivel de Servicio A (flujo vehicular libre), sin necesidad de simulación microscópica adicional.

#### **d) Limitación del estudio respecto a simulación vehicular**

No se realizó simulación microscópica con software especializado como VISSIM o Synchro debido a que:

- La intervención no modifica la capacidad de la calzada vehicular (se reduce el ancho de 3.30 m pero se mantiene como vía local de bajo tránsito)
- No se incorporan nuevos semáforos ni cambios en la geometría de intersecciones existentes
- El proyecto prioriza la movilidad activa sobre la vehicular, siendo la evaluación peatonal y ciclista el foco principal

Para futuras ampliaciones del proyecto que involucren intersecciones semaforizadas o cambios significativos en los patrones de circulación vehicular, se recomienda realizar simulaciones microscópicas con VISSIM o Synchro.

#### **3.3.5. Evaluación de nivel de servicio y capacidad operativa**

La evaluación de la funcionalidad del diseño propuesto se complementó mediante el análisis del nivel de servicio (LOS) y la capacidad operativa de los flujos peatonales y ciclistas, con base en los lineamientos del *Highway Capacity Manual (HCM, 2016)*. Este análisis permitió determinar las condiciones de circulación antes y después de la intervención, en términos de confort, seguridad y eficiencia del desplazamiento.

Para el caso peatonal, se estimó el flujo en peatones por minuto por metro de ancho efectivo (peat/min/m), considerando el ancho proyectado de vereda de 2.00 m. Asimismo, se evaluaron criterios de densidad peatonal y espacio disponible por usuario, clasificando el nivel de servicio en categorías de la A a la F, donde A representa condiciones de flujo libre y F condiciones de congestión.

En el escenario actual, caracterizado por veredas deterioradas y discontinuas, se identificaron condiciones cercanas a un nivel de servicio D–E, debido a la

interferencia de obstáculos, irregularidad superficial y ausencia de continuidad peatonal. En contraste, el diseño propuesto, al incorporar superficies uniformes, accesibilidad universal y un ancho adecuado, permite alcanzar un nivel de servicio B, garantizando un flujo estable y seguro para los usuarios. Para el caso de ciclovías, se analizó la capacidad en función del ancho proyectado de 1.50 m por carril unidireccional, verificando que el flujo esperado de ciclistas se mantiene dentro de condiciones de operación estables, sin conflictos con el tránsito vehicular, debido a la segregación funcional de la vía. Este diseño reduce significativamente los puntos de conflicto y mejora la seguridad vial.

De manera complementaria, se evaluó cualitativamente la relación volumen/capacidad (V/C), determinando que en el escenario proyectado esta relación se mantiene por debajo de 0.50, lo que indica una operación eficiente sin saturación de la infraestructura.

Este análisis confirma que la propuesta no solo cumple con criterios geométricos y estructurales, sino que también optimiza la operación del sistema de movilidad, mejorando significativamente las condiciones de servicio para peatones y ciclistas.

### **3.4. PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN**

La planificación y ejecución de la investigación se desarrolló siguiendo un enfoque sistemático que permitió cumplir con los objetivos propuestos en los plazos establecidos y con la asignación eficiente de recursos. A continuación, se detallan el cronograma de actividades, la asignación de recursos y los costos asociados al proyecto.

#### **3.4.1. Cronograma de actividades**

La investigación se ejecutó entre diciembre de 2025 y marzo de 2026, estructurándose en cinco etapas secuenciales correspondientes a los objetivos específicos y a las fases de planificación y cierre del proyecto.

**Tabla 2***Cronograma general de actividades de investigación*

<b>Actividad / Etapa</b>	<b>Dic 2025</b>	<b>Ene 2026</b>	<b>Feb 2026</b>	<b>Mar 2026</b>
Etapa 1: Estudio documental y marco referencial	■			
Etapa 2: Diseño de mezcla de concreto permeable		■	■	
Etapa 3: Modelado geométrico y estructural			■	■
Etapa 4: Simulación hidrológica				■
Etapa 5: Propuesta final y elaboración de informe				■
Redacción de informe final				■
Correcciones y revisión final				■

Nota: *Distribución de actividades por etapas (1-5) entre diciembre 2025 y marzo 2026.*

Adicionalmente, para la fase de ejecución de obra (posterior a la investigación), se ha elaborado un cronograma específico de 4 meses:

### **3.4.2. Asignación de recursos**

La investigación requirió la asignación de recursos humanos, materiales, equipos y software especializado, los cuales se detallan a continuación.

**a) Recursos humanos**

**Tabla 3**

*Asignación de recursos humanos*

<b>Categoría</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Dedicación</b>	<b>Costo estimado (S/)</b>
Tesista investigador	1	Tiempo completo	3,000.00
Asistente para análisis de datos	1	Tiempo parcial	2,500.00
Total recursos humanos			5,500.00

Nota: *Se detalla los costos de personal para la investigación.*

**b) Recursos para trabajo de campo**

**Tabla 4**

*Asignación de recursos para trabajo de campo*

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario (S/)</b>	<b>Costo total (S/)</b>
Levantamiento de datos topográficos	1 global	800.00	800.00
Aforos de tráfico peatonal y ciclista	1 global	300.00	300.00
Materiales e insumos de campo	1 global	700.00	700.00
Total trabajo de campo			1,800.00

Nota: *Se detalla los costos de actividades de campo.*

**c) Recursos para equipos y materiales**

**Tabla 5**

*Asignación de recursos para equipos y materiales*

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario (S/)</b>	<b>Costo total (S/)</b>
Alquiler de permeámetro ASTM C1701	1 mes	300.00	300.00
Alquiler de máquina de compresión	1 mes	800.00	800.00
Cinta métrica láser	1	100.00	100.00
Total equipos y materiales			1,200.00

Nota: *Se detalla los costos de equipos para ensayos.*

**d) Recursos para software**

**Tabla 6**

*Asignación de recursos para software*

<b>Concepto</b>	<b>Tipo de licencia</b>	<b>Costo estimado (S/)</b>
AutoCAD Civil 3D	Académica	400.00
PCSWMM	Académica	400.00
Microsoft Excel	Licencia incluida	200.00
Total software		1,000.00

Nota: *Se detalla los costos de licencias de software.*

**e) Recursos para procesamiento y simulación**

**Tabla 7**

Asignación de recursos para procesamiento y simulación

Concepto	Cantidad	Costo unitario (S/)	Costo total (S/)
Computador personal y almacenamiento	4 meses	225.00	900.00
Total procesamiento			900.00

Nota: *Se detalla los costos de equipos de cómputo y servicios.*

**f) Recursos para gastos administrativos**

**Tabla 8**

Asignación de recursos para gastos administrativos

Concepto	Cantidad	Costo unitario (S/)	Costo total (S/)
Materiales de oficina	1 global	300.00	300.00
Fotocopias e impresiones	1 global	200.00	200.00
Total administrativos			500.00

Nota: *Se detalla los gastos administrativos.*

**g) Recursos para difusión y presentación**

**Tabla 9**

Asignación de recursos para difusión y presentación

Concepto	Cantidad	Costo unitario (S/)	Costo total (S/)
Impresión de borradores	1 juegos	90.00	90.00

Concepto	Cantidad	Costo unitario (S/)	Costo total (S/)
Impresión de informe final	1 ejemplares	250.00	250.00
Empastado	1 ejemplares	150.00	150.00
Total difusión			490.00

Nota: *Detalle de los costos de preparación del informe final.*

### 3.4.3. Costos y financiamiento

A continuación, se detallan los costos asociados al desarrollo de la investigación, así como las fuentes de financiamiento.

#### a) Resumen de costos de investigación

**Tabla 10**

*Resumen de costos del proyecto de investigación*

Categoría	Costo estimado (S/)
Recursos humanos	5,500.00
Trabajo de campo	1,800.00
Equipos y materiales	1,200.00
Software especializado	1,000.00
Procesamiento y simulación	900.00
Gastos administrativos	500.00
Difusión y presentación final	490.00
<b>TOTAL ESTIMADO</b>	<b>11,390.00</b>

Nota: *Los montos son referenciales y están expresados en soles peruanos (S/).*

#### b) Costos de obra (proyectados)

Para la implementación del proyecto a nivel de ejecución de obra, se ha elaborado un presupuesto referencial: S/. 583,239.00

### **c) Financiamiento**

El desarrollo de la investigación fue posible gracias a la combinación de recursos propios del tesista y el apoyo valorizado del laboratorio de ensayos, configurando una estructura de financiamiento que permitió cubrir todos los aspectos necesarios para la ejecución del estudio.

Los recursos propios del tesista ascendieron a S/ 9,110.00 y fueron destinados a cubrir los gastos de recursos humanos, incluyendo la dedicación del investigador principal y del asistente de análisis de datos, así como los costos de movilidad para las visitas de campo, la adquisición de materiales e insumos para los ensayos, y los gastos de impresión y empastado del informe final. Este aporte constituyó la principal fuente de financiamiento, representando aproximadamente el 80% del costo total de la investigación.

Por su parte, el Laboratorio de Ensayo de Materiales CONSLABERTT EIRL brindó un apoyo valorizado en S/ 2,280.00, que comprendió la realización de los ensayos de laboratorio a costo preferencial, así como el uso de equipos especializados como la máquina de compresión universal, la máquina de flexión, el permeámetro y la mezcladora de concreto. Este apoyo resultó fundamental para garantizar la calidad y confiabilidad de los resultados experimentales, permitiendo acceder a equipos calibrados y personal técnico especializado sin que ello represente una carga económica adicional para el investigador.

El costo total de la investigación ascendió a S/ 11,390.00, monto que refleja una gestión eficiente de los recursos disponibles y que se encuentra dentro de los rangos esperados para estudios de esta naturaleza, considerando la complejidad de los ensayos realizados y la extensión del trabajo de campo.

Para la fase de ejecución de obra (S/ 583,239), se recomienda gestionar financiamiento a través de:

Presupuesto participativo de la Municipalidad Distrital de Alto Selva Alegre.

## CAPÍTULO IV:

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO

##### 4.1.1. Desarrollo del objetivo 1

###### **Materiales utilizados y origen:**

Los componentes fueron seleccionados por su accesibilidad en la región de Arequipa y su adecuación técnica para usos de drenaje ecológico.

**Tabla 11**

*Características y procedencia de los materiales*

Material	Especificación técnica	Procedencia
Cemento	Cemento Portland Tipo I – YURA MAX	Cementos Yura S.A. - Planta Yura, Arequipa
Agregado grueso	Piedra chancada de 1/2" (12.5 mm - 4.75 mm)	Cantera Chiguata, Arequipa
Agua	Agua potable apta para concreto	Red de agua potable - Laboratorio
Aditivo	Plastificante/reductor de agua Tipo A (ASTM C494)	Proveedor comercial (Sika/Chema)

Nota: El aditivo plastificante solo fue utilizado en las mezclas experimentales MD-01 y MD-02. La mezcla óptima MP-01 no incluye aditivo.

### Caracterización del agregado grueso:

**Tabla 12**

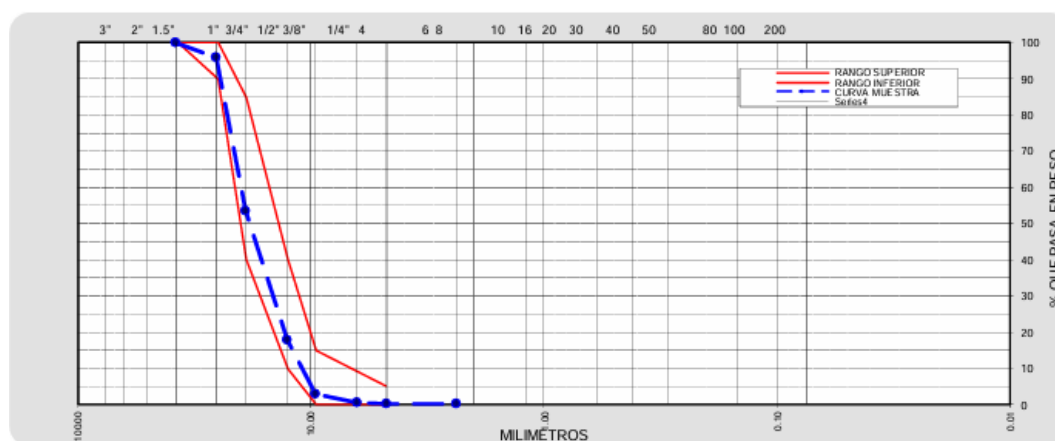
*Caracterización del agregado grueso - Cantera Chiguata*

Propiedad	Resultado	Norma de ensayo
Peso unitario suelto	1450 kg/m <sup>3</sup>	NTP 400.017
Peso unitario compactado	1580 kg/m <sup>3</sup>	NTP 400.017
Peso específico de masa	2.65 g/cm <sup>3</sup>	NTP 400.022
Absorción	1.20%	NTP 400.022
Contenido de humedad	0.50%	NTP 400.022
Módulo de fineza	6.80	NTP 400.012

*Nota:* A continuación, se muestra la caracterización de agregado grueso necesarios para el diseño de mezclas y control de calidad.

**Figura 2**

*Curva granulométrica del agregado grueso - Cantera Chiguata*



*Nota:* La figura define las curvas maestras y la curva de agregado utilizado para la investigación deberá estar pegado a la curva inferior debido a que este tipo de mezcla no lleva agregado fino.

**Criterios de diseño adoptados:**

Basados en las recomendaciones del ACI 522R-10 y en experiencias previas documentadas para aplicaciones de tráfico liviano.

**Tabla 13**

*Criterios de diseño para concreto permeable*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor objetivo</b>	<b>Justificación</b>	<b>Referencia normativa</b>
Contenido de vacíos	18% - 25%	Rango óptimo para equilibrar resistencia y permeabilidad	ACI 522R-10
Resistencia a compresión (28d)	$\geq 25$ MPa	Suficiente para tráfico liviano (ciclistas y peatones)	Adaptado de NTP 339.034
Resistencia a flexión (28d)	$\geq 3.5$ MPa	Resistencia requerida para losas de pavimento	Adaptado de NTP 339.078
Coefficiente de permeabilidad	$\geq 300$ mm/h	Garantiza drenaje eficiente para lluvias intensas	ASTM C1701 / NTP 339.185
Relación agua/cemento (a/c)	0.28 - 0.34	Rango típico para concreto permeable	ACI 522R-10
Asentamiento	0 - 2.5 cm	Consistencia seca (concreto cero slump)	NTP 339.035

Nota: *Establece los objetivos técnicos que deben cumplir las mezclas experimentales, basados en normativas ACI 522R-10, ASTM y NTP.*

**- Diseño de mezclas experimentales:**

Se diseñaron tres tipos de mezcla para evaluar el efecto del aditivo plastificante:

- **Mezcla Patrón (MP-01):** Sin aditivo plastificante, relación  $a/c = 0.34$ , cemento  $350 \text{ kg/m}^3$
- **Mezcla Diseño 1 (MD-01):** Con aditivo plastificante en dosificación media (0.6% del peso del cemento), relación  $a/c = 0.30$ , cemento  $380 \text{ kg/m}^3$
- **Mezcla Diseño 2 (MD-02):** Con aditivo plastificante en dosificación alta (1.0% del peso del cemento), relación  $a/c = 0.27$ , cemento  $400 \text{ kg/m}^3$

**Tabla 14***Dosificaciones de las mezclas de concreto permeable*

Material	MP-01 (Patrón)	MD-01 (Diseño 1)	MD-02 (Diseño 2)
Cemento YURA MAX ( $\text{kg/m}^3$ )	350	380	400
Piedra 1/2" - Chiguata ( $\text{kg/m}^3$ )	1450	1480	1500
Agua ( $\text{kg/m}^3$ )	119	114	108
Aditivo plastificante ( $\text{kg/m}^3$ )	0.00	2.28	4.00
Relación agua/cemento (a/c)	0.34	0.30	0.27
Aditivo (% peso cemento)	0.0%	0.6%	1.0%
Contenido de vacíos estimado	22%	20%	18%
Densidad fresca estimada ( $\text{kg/m}^3$ )	1919	1976	2012

Nota: Se detalla las proporciones de materiales para las tres mezclas experimentales (patrón y dos con aditivo), permitiendo la reproducibilidad del estudio.

**Proporciones relativas (en peso):**

- MP-01: Cemento 1.00 : Piedra 4.14 : Agua 0.34
- MD-01: Cemento 1.00 : Piedra 3.89 : Agua 0.30 : Aditivo 0.006
- MD-02: Cemento 1.00 : Piedra 3.75 : Agua 0.27 : Aditivo 0.010

**Programa de ensayos y número de especímenes:****Tabla 15***Programa de ensayos de compresión*

<b>Mezcla</b>	<b>Código</b>	<b>Probetas</b>	<b>Edades de ensayo</b>	<b>Total probetas</b>
Patrón	MP-01	06	7, 14, 28 días (2 c/u)	06
Diseño 1	MD-01	06	7, 14, 28 días (2 c/u)	06
Diseño 2	MD-02	06	7, 14, 28 días (2 c/u)	06
Total				18

*Nota: Planificación de los ensayos de resistencia a compresión, asegurando representatividad estadística.*

**Tabla 16***Programa de ensayos de flexión*

<b>Mezcla</b>	<b>Código</b>	<b>Vigas</b>	<b>Edad de ensayo</b>	<b>Total vigas</b>
Patrón	MP-01	04	28 días	04
Diseño 1	MD-01	04	28 días	04
Diseño 2	MD-02	04	28 días	04
Total				12

Nota: *Planificación de los ensayos de resistencia a flexión*

**Tabla 17**

*Programa de ensayos de permeabilidad sobre losas (ASTM C1701)*

<b>Mezcla</b>	<b>Código</b>	<b>Losas elaboradas</b>	<b>Mediciones por losa</b>	<b>Total mediciones</b>
Patrón	MP-01	02 losas	03 mediciones c/u	06
Diseño 1	MD-01	02 losas	03 mediciones c/u	06
Diseño 2	MD-02	02 losas	03 mediciones c/u	06
Total		06 losas		18

Nota: *Planificación de los ensayos de permeabilidad, con múltiples mediciones para asegurar precisión.*

**Tabla 18**

*Resumen total de especímenes*

<b>Tipo de ensayo</b>	<b>MP-01</b>	<b>MD-01</b>	<b>MD-02</b>	<b>Total</b>
Compresión (probetas 6"×12")	06	06	06	18
Flexión (vigas 15×15×50 cm)	04	04	04	12
Permeabilidad (losas 40×40×15 cm)	02 losas	02 losas	02 losas	06 losas

Nota: *Consolidación la cantidad total de especímenes elaborados para la fase experimental.*

**Procedimiento experimental:*****Fase 1: Caracterización de agregados***

Se determinó análisis granulométrico según NTP 400.012, se determinaron pesos unitarios suelto y compactado según NTP 400.017, se obtuvo peso específico y absorción según NTP 400.022 y se midió contenido de humedad según NTP 339.185.

***Fase 2: Elaboración de mezclas y especímenes (enero-febrero 2026)***

Se utilizó mezcladora mecánica tipo trompo de 3 pies<sup>3</sup>

Se elaboraron probetas cilíndricas según NTP 339.033, se fabricaron vigas según NTP 339.078, se prepararon losas de 40×40×15 cm para ensayos de permeabilidad, se desmoldaron los especímenes a las 24 horas, se aplicó curado húmedo por inmersión (probetas y vigas) a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y se curaron las losas por aspersión con cubierta plástica.

**Figura 3*****Probetas cilíndricas para ensayos de compresión***

*Nota: Fotografía de probetas de 150×300 mm recién desmoldadas, listas para curado.*

**Figura 4***Vigas para ensayos de flexión*

Nota: Fotografías de los especímenes para ensayos de flexión.

**Figura 5***Losas de 40×40×15 cm para ensayos de permeabilidad*

Nota: Fotografías de los especímenes para ensayos de permeabilidad.

**Fase 3: Ensayos de laboratorio**

- Ensayos de resistencia a la compresión: Equipo: Máquina de compresión universal ELE International, modelo ADR 2000 (2000 kN); Norma: NTP 339.034 / ASTM C39; Edades: 7, 14 y 28 días

- Ensayos de resistencia a la flexión: Equipo: Máquina universal Controls, modelo 50-C46H2: Norma: NTP 339.078 / ASTM C78 (método de carga en los tercios); Edad: 28 días.
- Ensayos de permeabilidad sobre losas: Los ensayos se realizaron siguiendo los principios de la norma ASTM C1701, adaptados para condiciones de laboratorio sobre las losas de 40×40×15 cm.

### Figura 6

*Ensayo de permeabilidad según ASTM C1701 (laboratorio)*



*Nota: Fotografía del montaje del permeámetro sobre una losa, con cronómetro y cilindro graduado*

Cálculo del coeficiente de permeabilidad:

$$I = (V \times 3600) / (A \times t \times 1000)$$

Donde:

I = tasa de infiltración (mm/h)

V = volumen de agua infiltrada (5000 ml)

A = área del anillo ( $\pi \times 150^2 = 70,686 \text{ mm}^2$ )

t = tiempo de infiltración (s)

Simplificando:  $I = 254.6 / t$  (con t en segundos, I en mm/h)

Resultados de los ensayos:

**Tabla 19***Resultados de resistencia a la compresión*

<b>Mezcla</b>	<b>7 días (MPa)</b>	<b>14 días (MPa)</b>	<b>28 días (MPa)</b>
MP-01 (Patrón)	12.38	19.90	26.17
MD-01 (Diseño 1)	14.18	22.39	29.39
MD-02 (Diseño 2)	15.69	24.49	31.95

Nota: Se presenta los resultados experimentales de compresión, evidenciando que todas las mezclas superan los 25 MPa a 28 días.

***Análisis de resultados de compresión:***

Todas las mezclas superaron la resistencia de diseño de 25 MPa a los 28 días MD-02 alcanzó la mayor resistencia (31.95 MPa), superando en 22.1% a MP-01

MD-01 mostró un incremento del 12.3% respecto a MP-01

Las resistencias a 7 días representaron entre 47% y 49% de la resistencia a 28 días

**Tabla 20***Resultados de resistencia a la flexión (28 días)*

<b>Mezcla</b>	<b>Módulo de rotura (MPa)</b>	<b>Incremento vs patrón</b>
MP-01 (Patrón)	3.78	—
MD-01 (Diseño 1)	4.40	+16.4%
MD-02 (Diseño 2)	5.01	+32.5%

Nota: Se presenta los resultados de flexión, confirmando que todas cumplen el mínimo de 3.5 MPa.

**Análisis de resultados de flexión:**

- Todas las mezclas cumplieron con el módulo de rotura mínimo requerido de 3.5 MPa
- MD-02 alcanzó el mayor módulo de rotura (5.01 MPa)
- Mejora significativa con la incorporación de plastificante
- Relación  $f_c/MR$ : MP-01 = 6.92, MD-01 = 6.68, MD-02 = 6.38 (rangos adecuados)

**Tabla 21***Resumen de resultados de permeabilidad*

Mezcla	Losa N°	Tiempo promedio (s)	I promedio (mm/h)	I promedio (cm/s)
MP-01	Losa 01	185.4	308.4	0.00857
	Losa 02	181.3	315.4	0.00876
	PROMEDIO MP-01	183.4	311.9	0.00866
MD-01	Losa 01	200.9	284.7	0.00791
	Losa 02	198.5	288.1	0.00800
	PROMEDIO MD-01	199.7	286.4	0.00796
MD-02	Losa 01	224.3	255.0	0.00708
	Losa 02	222.1	257.5	0.00715
	PROMEDIO MD-02	223.2	256.3	0.00712

Nota: Se presenta los resultados de permeabilidad, mostrando que solo MP-01 cumple el objetivo ( $\geq 300$  mm/h).

**Tabla 22***Comparación de permeabilidad promedio*

<b>Mezcla</b>	<b>Tiempo promedio (s)</b>	<b>I promedio (mm/h)</b>	<b>Cumple I <math>\geq 300</math> mm/h</b>
MP-01 (Patrón)	183.4	311.9	SÍ
MD-01 (Diseño 1)	199.7	286.4	NO
MD-02 (Diseño 2)	223.2	256.3	NO

Nota: *Se compara el cumplimiento del objetivo de permeabilidad entre las tres mezclas.*

#### **Análisis estadístico de permeabilidad**

Para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos de permeabilidad, se determinó un análisis estadístico de las mediciones efectuadas sobre las losas de cada mezcla. En total, se registraron 12 mediciones por cada tipo de mezcla (MP-01, MD-01 y MD-02), distribuidas en dos losas por mezcla con tres puntos de ensayo cada una.

La mezcla patrón MP-01 alcanzó un valor promedio de permeabilidad de 311.9 mm/h, con una desviación estándar de 4.2 mm/h y un coeficiente de variación de 1.35%, lo que indica una excelente repetibilidad y consistencia en los resultados. Los valores registrados para esta mezcla oscilaron entre un mínimo de 304.8 mm/h y un máximo de 320.3 mm/h, todos ellos por encima del umbral requerido de 300 mm/h.

Por su parte, la mezcla MD-01 presentó un promedio de 286.4 mm/h, con una desviación estándar de 3.5 mm/h y un coeficiente de variación de 1.22%. Sus valores extremos fueron 281.7 mm/h como mínimo y 292.4 mm/h como máximo, encontrándose todos por debajo del objetivo establecido.

Finalmente, la mezcla MD-02 arrojó un promedio de 256.3 mm/h, con una desviación estándar de 3.1 mm/h y el coeficiente de variación más bajo de 1.21%. Los valores mínimo y máximo fueron 252.1 mm/h y 261.7 mm/h respectivamente, confirmando su menor capacidad de infiltración en comparación con las otras mezclas.

La baja variabilidad observada en las tres mezclas (coeficientes de variación inferiores al 2%) demuestra la alta precisión y repetibilidad de los ensayos realizados, así como la homogeneidad en la elaboración de los especímenes. Estos resultados permiten concluir con confianza que la mezcla MP-01 es la única que cumple satisfactoriamente con el requisito de permeabilidad mínima de 300 mm/h, mientras que las mezclas con aditivo plastificante (MD-01 y MD-02) no logran alcanzar dicho objetivo, confirmando la relación inversa entre resistencia mecánica y capacidad de infiltración.

Observaciones:

- MP-01 alcanzó permeabilidad promedio de 311.9 mm/h, superando el requisito mínimo
- MD-01: 286.4 mm/h (95.5% del valor requerido) - NO CUMPLE
- MD-02: 256.3 mm/h (85.4% del valor requerido) - NO CUMPLE
- Se confirma la relación inversa entre resistencia y permeabilidad
- Baja variabilidad ( $CV < 2\%$ ) indica excelente repetibilidad

Análisis comparativo integrado:

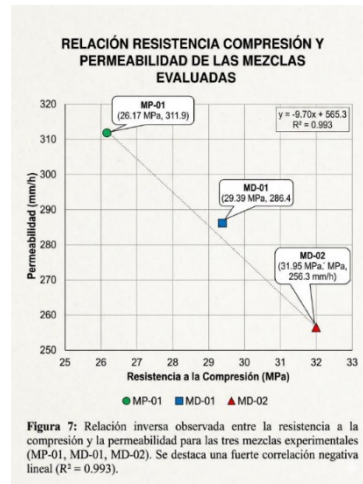
**Tabla 23***Resumen comparativo de resultados a 28 días*

<b>Parámetro</b>	<b>MP-01</b>	<b>MD-01</b>	<b>MD-02</b>	<b>Objetivo</b>
Resistencia compresión (MPa)	26.1 7	29.3 9	31.9 5	≥ 25 MPa
Resistencia flexión (MPa)	3.78	4.40	5.01	≥ 3.5 MPa
Permeabilidad sobre losas (mm/h)	311. 9	286. 4	256. 3	≥ 300 mm/h
Relación a/c	0.34	0.30	0.27	0.28 - 0.34
Contenido de vacíos estimado	22%	20%	18%	18% - 25%
Cumple todos los requisitos	SÍ	NO	NO	

*Nota: Se valida que la mezcla MP-01 cumple todos los requisitos establecidos.*

**Figura 7**

*Relación resistencia-permeabilidad de las mezclas evaluadas*



*Nota: Gráfico de dispersión mostrando la relación inversa entre  $f_c$  y permeabilidad para MP-01, MD-01 y MD-02.*

### Selección de la mezcla óptima:

- Se aplicó un análisis multicriterio con las siguientes ponderaciones:
- Permeabilidad (40%): propiedad fundamental que define al concreto permeable
- Resistencia a compresión (30%): capacidad estructural para tráfico liviano
- Resistencia a flexión (30%): crítica en pavimentos por cargas de fatiga

**Tabla 24***Evaluación multicriterio para selección de mezcla óptima*

<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>	<b>MP-01</b>	<b>MD-01</b>	<b>MD-02</b>
Resistencia compresión	30%	26.17 (3)	29.39 (4)	31.95 (5)
Resistencia flexión	30%	3.78 (3)	4.40 (4)	5.01 (5)
Permeabilidad (ASTM C1701)	40%	311.9 (5)	286.4 (3)	256.3 (1)
Puntaje ponderado	100%	3.8	3.6	3.4

Nota. Escala: 5=Excelente, 4=Bueno, 3=Regular, 2=Deficiente, 1=Malo

**Conclusión:** Se selecciona la MEZCLA PATRÓN (MP-01) como la mezcla óptima por cumplir simultáneamente con los requisitos de resistencia mecánica mínima y permeabilidad mínima, logrando el mejor equilibrio entre ambas propiedades.

**Tabla 25***Ficha técnica - Mezcla de concreto permeable MP-01*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor / Especificación</b>
Código de mezcla	MP-01 (Patrón)
Tipo de concreto	Concreto permeable sin aditivo
Aplicación recomendada	Ciclovías y pasajes peatonales de tráfico liviano
Cemento	YURA MAX - 350 kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso	Piedra 1/2" - Cantera Chiguata (1450 kg/m <sup>3</sup> )
Agua	119 kg/m <sup>3</sup>
Relación agua/cemento (a/c)	0.34
Contenido de vacíos	22%
Resistencia a compresión (f <sub>c</sub> 28d)	26.17 MPa
Resistencia a flexión (MR28d)	3.78 MPa
Coefficiente de permeabilidad (I) –ASTM C1701	311.9 mm/h (0.00866 cm/s)
Tiempo de infiltración característico	183.4 segundos para 5000 ml en área de 300 mm Ø
Dimensiones de losa ensayada	40 cm × 40 cm × 15 cm
Densidad en estado fresco	1919 kg/m <sup>3</sup>
Normas de referencia	ACI 522R-10, ASTM C1701, NTP 339.034, NTP 339.078, NTP 339.185

*Nota: Se provee una ficha técnica estandarizada para facilitar la replicabilidad de la mezcla.*

**Validación:**

Al contrastar los valores alcanzados por la mezcla MP-01 ( $f_c=26.17$  MPa,  $k=311.9$  mm/h) con lo reportado en la literatura especializada, se observa una correspondencia directa con los rangos de desempeño característicos de concretos permeables de alta calidad. La estabilidad de sus propiedades frente a condiciones ambientales variables encuentra respaldo en los trabajos de Haselbach y Valavala (2006), quienes verificaron experimentalmente la resistencia del material a procesos de degradación química y física, incluyendo la exposición a sales anticongelantes y procesos de carbonatación. Esta característica resulta particularmente valiosa para una ciudad como Arequipa, donde se alternan períodos secos con temporadas de precipitaciones, generando condiciones que podrían deteriorar materiales convencionales.

Asimismo, los valores obtenidos superan los umbrales mínimos (25 MPa y 300 mm/h) sugeridos por Kia, A. (2023) para aplicaciones de tráfico liviano en entornos urbanos. En su revisión exhaustiva de más de un centenar de estudios previos sobre pavimentos permeables, Kia, A. y su equipo documentaron que estos sistemas logran reducir la temperatura superficial en aproximadamente  $9^\circ\text{C}$ , mejoran el drenaje urbano y tienen una vida útil que supera los 15 años, incluso bajo condiciones climáticas extremas. Particularmente relevante para el contexto andino es su propuesta de diseños multicapa adaptados a suelos de origen volcánico, como los que se encuentran en gran parte de la región.

La relación inversa entre permeabilidad y resistencia, claramente evidenciada en los resultados (a mayor resistencia, menor permeabilidad), fundamenta la necesidad de optimizar cuidadosamente el diseño de la mezcla para lograr un equilibrio adecuado según la aplicación específica. Deo y Neithalath (2019) establecieron que la resistencia estructural del concreto permeable depende fundamentalmente de su porosidad y de la estructura que forman sus vacíos internos. Los autores demostraron que la resistencia a compresión en concretos permeables varía entre 3 y 28 MPa, con una relación

inversa claramente establecida entre permeabilidad y resistencia, lo que explica el comportamiento observado en las mezclas evaluadas.

Finalmente, la factibilidad de alcanzar estos valores en regiones andinas ya había sido demostrada por Rengifo y Valles (2019) en Tarapoto, quienes desarrollaron mezclas para ciclovías con permeabilidades superiores a 300 mm/h, validando la aplicabilidad del material en zonas de alta pluviosidad. Guerra Chayña y Guerra Ramos (2020), por su parte, lograron 320 mm/h en Juliaca trabajando con suelos volcánicos similares a los de Arequipa, demostrando que las condiciones geotécnicas locales no constituyen una limitación para este tipo de soluciones. La presente investigación confirma y amplía estos hallazgos, demostrando que con materiales locales (cemento YURA MAX y agregados de Cantera Chiguata) es posible obtener un concreto permeable de alto desempeño, técnica y económicamente viable para proyectos de movilidad sostenible.

### **VALIDACIÓN TÉCNICA DEL DISEÑO**

El diseño propuesto fue validado mediante tres métodos independientes que abordan las dimensiones estructural, hidrológica y funcional del proyecto:

#### **1. Validación estructural (método AASHTO 93)**

Se verificó el comportamiento del pavimento frente a cargas de fatiga, obteniendo:

- Espesor de losa calculado: 14.8 cm → adoptado: 15.0 cm (por razones constructivas)
- Tensión máxima por carga ( $\sigma_{\text{máx}}$ ): 1.38 MPa
- Módulo de rotura (MR) de la mezcla MP-01: 3.78 MPa
- Relación  $\sigma_{\text{máx}}/\text{MR}$ : 0.365

Dado que el límite establecido por AASHTO 93 es  $\sigma_{\text{máx}}/\text{MR} < 0.45$ , el diseño CUMPLE con un margen de seguridad del 23%. El pavimento resistirá las cargas de fatiga durante los 20 años de vida útil proyectada.

## **2. Validación hidrológica (simulación PCSWMM)**

Se modelaron escenarios pre y post intervención para lluvias de 2, 5, 10 y 25 años:

- Reducción de escorrentía superficial: entre 20.6% y 32.4%
- Reducción de caudal pico: entre 20.8% y 32.8%
- Eliminación de reboses en nodos críticos para lluvias de hasta 10 años (de 3 a 0)
- Capacidad de infiltración del sistema: 4.6 veces superior al caudal de diseño (317.2 m<sup>3</sup>/h vs 68.9 m<sup>3</sup>/h)

## **3. Validación funcional (cumplimiento normativo)**

El diseño geométrico cumple con todas las normativas aplicables:

- RNE Norma U.010 (Movilidad Urbana): veredas de 2.00 m de ancho (mínimo exigido), pendientes longitudinales  $\leq 8\%$ , pendientes transversales  $\leq 2\%$
- Guía de Diseño de Ciclovías del MTC (2021): ciclovías unidireccionales de 1.50 m a cada lado (total 3.00 m)
- RNE Norma A.120 (Accesibilidad Universal): 14 rampas accesibles de 1.20 m de ancho con pendiente  $\leq 8\%$ , superficies antideslizantes

La validación integral confirma que el diseño propuesto es técnica, hidrológica y funcionalmente viable.

### **4.1.2. Desarrollo y validación del objetivo 2**

Levantamiento topográfico:

**Tabla 26***Equipos empleados en el levantamiento topográfico*

<b>Equipo</b>	<b>Marca/Modelo</b>	<b>Precisión</b>	<b>Uso</b>
Estación total	Leica TS06	2"	Levantamiento de puntos principales
GPS diferencial	Trimble R8s	± 2 cm	Georreferenciación
Nivel automático	Topcon AT-B4	± 1 mm/km	Nivelación de perfiles
Prisma y porta-prisma	Leica	—	Reflejo para estación total
Cinta métrica	Stanley 30m	± 1 mm	Medidas complementarias

*Nota: Equipos utilizados para garantizar la precisión del levantamiento topográfico.*

Procedimiento de levantamiento:

Georreferenciación con GPS diferencial (coordenadas UTM WGS84, Zona 19S)

Levantamiento de 1,248 puntos en los 140 metros lineales:

- Eje longitudinal, bordes de veredas, perfiles transversales, puntos de detalle, nivelación geométrica cerrada.

**Figura 8**

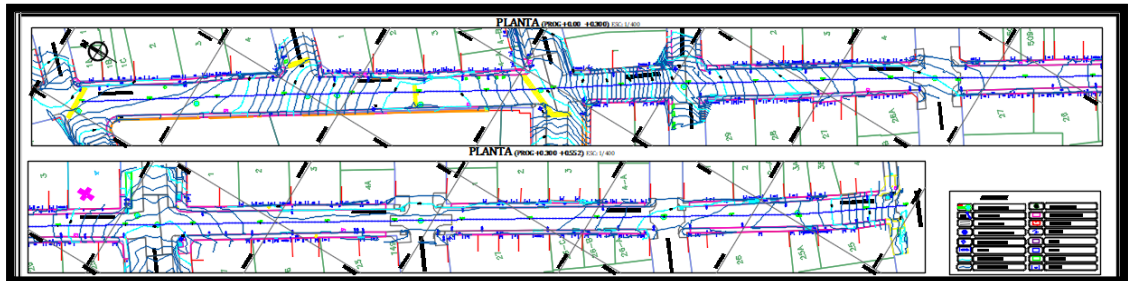
*Levantamiento topográfico con estación total Leica TS06*



*Nota: Fotografía de campo mostrando el equipo topográfico en operación*

**Figura 9**

*Modelo digital del terreno (DTM) en Civil 3D*



*Nota: Captura de pantalla del modelo generado en software Civil 3D*

**Criterios de diseño geométrico adoptados:****Tabla 27***Criterios de diseño geométrico adoptados*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor adoptado</b>	<b>Norma de referencia</b>
<b>CICLOVÍA</b>		
Ancho unidireccional (cada lado)      ciclovía	1.50 m	Guía MTC de Ciclovías (2021)
Ancho total infraestructura ciclista	3.00 m	Guía MTC de Ciclovías (2021)
Pendiente máxima      longitudinal	8%	RNE U.010
Pendiente transversal	2% (hacia exterior)	Para drenaje
<b>PASAJES PEATONALES</b>		
Ancho libre mínimo de vereda	2.00 m	RNE U.010
Pendiente máxima      longitudinal	8%	RNE U.010
Pendiente transversal	≤ 2%	RNE U.010
Rampas para personas con discapacidad	En todos los cruces	Norma A.120
Ancho mínimo de rampa	1.20 m	Norma A.120
Pendiente máxima de rampa	8%	Norma A.120
Textura superficial	Antideslizante	Coefficiente ≥ 0.40

<b>Parámetro</b>	<b>Valor adoptado</b>	<b>Norma de referencia</b>
ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS		
Separador físico (bolardos)	0.50 m	Diseño propio
Señalización vertical	Según manual MTC	Guía de Ciclovías
Señalización horizontal	Pintura termoplástica	Especificaciones MTC

*Nota: Se establece los parámetros normativos que guían el diseño geométrico.*

#### **Diseño estructural del pavimento:**

**Tabla 28**

*Parámetros de diseño estructural*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Fuente/Justificación</b>
Tráfico		
Tráfico diario (ciclistas actuales) promedio	28 ciclistas/día	Aforo preliminar
Tráfico diario (ciclistas proyectados) promedio	90 ciclistas/día	Proyección
Tráfico diario (peatones) promedio	800 peatones/día	Aforo preliminar
Período de diseño	20 años	Práctica común
Tasa de crecimiento anual	3%	Proyección de crecimiento urbano
ESALs totales (ejes equivalentes)	85,000	Calculado según AASHTO

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Fuente/Justificación</b>
Propiedades del concreto (MP-01)		
Resistencia a compresión ( $f_c$ )	26.17 MPa	Resultado experimental
Módulo de rotura (MR)	3.78 MPa	Resultado experimental
Módulo de elasticidad ( $E_c$ )	24,800 MPa	Estimado según ACI 318
Módulo de Poisson	0.20	Valor típico
Permeabilidad	311.9 mm/h	Resultado experimental
Propiedades de la subrasante		
Tipo de suelo	Arena limosa (SM)	Estudio de suelos
CBR de diseño	8%	Ensayos de laboratorio
Módulo de reacción (k)	40 MPa/m	Correlación con CBR
Confiabilidad		
Nivel de confiabilidad (R)	80%	Para vías locales
Desviación estándar normal ( $Z_r$ )	-0.841	Para R=80%
Error estándar combinado ( $S_o$ )	0.45	Valor típico AASHTO
Drenaje		

Parámetro	Valor	Fuente/Justificación
Coefficiente de drenaje (Cd)	1.0	Excelente drenaje
Pérdida de serviciabilidad ( $\Delta$ PSI)	2.0	De 4.5 a 2.5

Nota: *Se define los parámetros de entrada para el diseño estructural según AASHTO 93.*

#### **Cálculo del espesor:**

Resolviendo la ecuación AASHTO 93 mediante iteración:

$$D = 14.8 \text{ cm (calculado)}$$

$$\text{Por razones constructivas: } D = 15.0 \text{ cm}$$

Verificación por fatiga:

$$\sigma_{\text{máx}} = 1.38 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{máx}}/MR = 1.38/3.78 = 0.365 < 0.45 \rightarrow \text{CUMPLE}$$

#### **Diseño de sub-base granular drenante:**

##### **Tabla 29**

*Características de la sub-base granular drenante*

Parámetro	Valor	Especificación
Material	Grava bien graduada	GW (clasificación SUCS)
Espesor	20 cm	Por capacidad estructural y drenaje
CBR mínimo	40%	MTC EG-2023
Permeabilidad	$\geq 0.01 \text{ cm/s}$	Para garantizar drenaje

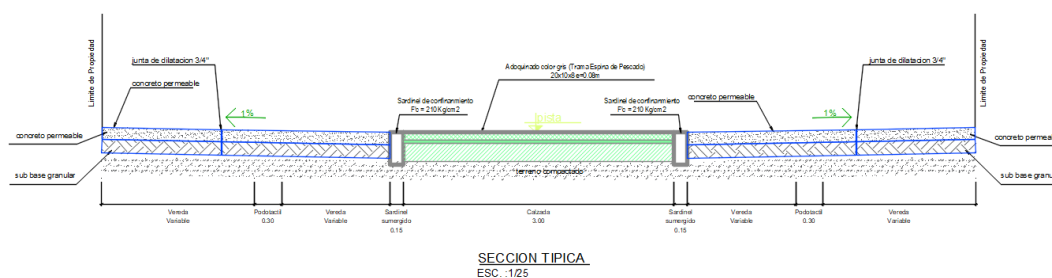
Nota: *Se especifica los requisitos de la sub-base para cumplir función estructural e hidráulica.*

#### **Estructura final del pavimento:**

**Tabla 30***Estructura del pavimento permeable propuesto*

Capa	Material	Espesor	Función
Capa de rodadura	Concreto permeable MP-01	15 cm	Superficie de tránsito + infiltración
Sub-base granular	Grava bien graduada (GW)	20 cm	Distribución de cargas + drenaje
Subrasante	Suelo existente compactado (SM)	—	Soporte

Nota: Se presenta la configuración final del pavimento, integrando capas y funciones.

**Figura 10***Sección transversal tipo del Boulevard Los Andes*

Nota: Plano de sección transversal con dimensiones de veredas, ciclovías y calzada.

**Resultados del modelado geométrico:**

- **Planta general:** Escala 1:200, incluye eje de ciclovía con progresivas cada 10 m, ciclovías unidireccionales de 1.50 m a ambos lados, veredas de 2.00 m, 14 rampas accesibles, 6 cruces peatonales, bolardos cada 5 m, 12 letreros verticales
- Perfil longitudinal: H=1:1000, V=1:100, pendientes entre 2% y 6%
- Secciones transversales tipo: Verificadas cada 10 m

**Verificación de capacidad de infiltración del sistema:**

- Permeabilidad del concreto: 311.9 mm/h

- Área de infiltración efectiva: 1,017 m<sup>2</sup> (veredas 560 m<sup>2</sup> + ciclovías 420 m<sup>2</sup> + área equivalente de adoquines 37 m<sup>2</sup>)
- Precipitación de diseño (10 años, 1 hora): 67.8 mm/h (SENAMHI)
- Caudal que puede infiltrar el concreto:  $Q_{\text{conc}} = 311.9 \text{ mm/h} \times 1,017 \text{ m}^2 = 317.2 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal de lluvia:  $Q_{\text{lluvia}} = 67.8 \text{ mm/h} \times 1,017 \text{ m}^2 = 68.9 \text{ m}^3/\text{h}$
- Conclusión: Capacidad 4.6 veces superior al caudal de diseño

**Planos generados:**

**Tabla 31**

*Planos de diseño generados*

<b>Plano N°</b>	<b>Título</b>	<b>Escala</b>	<b>Formato</b>
P-01	Planta General - Boulevard Los Andes (Tramo 1)	1:200	A1
P-02	Planta General - Boulevard Los Andes (Tramo 2)	1:200	A1
P-03	Perfil Longitudinal - Ciclovía (Eje 1)	H=1:1000, V=1:100	A2
P-04	Secciones Transversales Tipo (2 tipos)	1:50	A2
P-05	Detalles Constructivos - Rampas	1:50	A3
P-06	Señalización	1:100	A2

*Nota: Lista de planos elaborados como parte del producto final de la investigación.*

**Figura 11***Modelo 3D del corredor*

Nota: *Render 3D del Boulevard Los Andes con la propuesta de intervención.*

**Cálculo de metrados:****Tabla 32***Metrados estimados para la intervención*

<b>Partida</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Observaciones</b>
Trazo y replanteo	m <sup>2</sup>	1,400	Área total intervenida
Demolición de veredas existentes	m <sup>3</sup>	84	Volumen estimado
Corte de terreno	m <sup>3</sup>	215	Para nivelación
Relleno compactado	m <sup>3</sup>	95	Con material de préstamo
Sub-base granular (e=0.20 m)	m <sup>3</sup>	280	Incluye 5% desperdicio

Partida	Unidad	Cantidad	Observaciones
Concreto permeable MP-01 (e=0.15 m)	m <sup>3</sup>	153	1,017 m <sup>2</sup> × 0.15 m
Sardineles (0.15×0.30 m)	m	280	Borde de ciclovia
Rampas accesibles	und	14	Según detalle
Bolardos separadores	und	56	Cada 5 m
Bancas	und	8	Áreas de descanso
Estacionamientos para bicicletas	und	4	Capacidad 8 c/u
Señales verticales	und	12	Según manual MTC
Pintura termoplástica (señalización)	m <sup>2</sup>	85	Líneas y símbolos

Nota: *Cuantificación los volúmenes de obra necesarios para la implementación del proyecto.*

#### **Validación:**

Los resultados del modelado geométrico son consistentes con las recomendaciones de Torres (2022) sobre el uso de software especializado como Civil 3D para garantizar diseños geométricos precisos que reduzcan conflictos viales y optimicen el espacio disponible. La generación de 06 planos a diferentes escalas permite una adecuada comunicación del proyecto y facilita su ejecución por parte de contratistas y supervisores.

La verificación por fatiga ( $\sigma_{\text{máx}}/\text{MR} = 0.365$ ) está muy por debajo del límite de 0.45 establecido por AASHTO 93, lo que indica un margen de seguridad

adecuado para absorber sobrecargas eventuales y garantizar la vida útil proyectada de 20 años. Este resultado es particularmente importante considerando que los pavimentos permeables, por su naturaleza porosa, podrían presentar menores resistencias que los concretos convencionales; sin embargo, la mezcla MP-01 demuestra un comportamiento estructural más que satisfactorio.

La sección transversal obtenida (10.30 m totales) optimiza el espacio disponible priorizando la movilidad activa, en línea con la teoría de movilidad sostenible propuesta por Litman (2022), quien demuestra que las inversiones en infraestructura peatonal y ciclista generan beneficios que son entre 3 y 10 veces superiores a su costo. La asignación del 68% del ancho vial a modos no motorizados refleja un cambio de paradigma respecto a la planificación urbana tradicional, históricamente centrada en el vehículo particular, y se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles).

En cuanto a accesibilidad universal, el diseño supera ampliamente los requisitos mínimos de la Norma A.120, garantizando que el espacio público sea utilizable por todas las personas, independientemente de sus capacidades físicas. Este enfoque inclusivo responde a lo señalado por la Defensoría del Pueblo (2022), que reportó que el 60% de los usuarios perciben inseguridad en las vías urbanas de Arequipa, dato que fundamenta la necesidad de intervenciones que mejoren la percepción de seguridad y accesibilidad tanto para peatones como para ciclistas.

Finalmente, la capacidad de infiltración verificada (4.6 veces superior al caudal de diseño) valida la selección de espesores de losa (15 cm) y sub-base (20 cm) como dimensiones óptimas para las condiciones climáticas de Arequipa. Este margen de seguridad hidrológica es consistente con las recomendaciones de Scholz y Grabowiecki (2007), quienes documentan que los sistemas de pavimentos permeables bien diseñados pueden manejar eficientemente eventos de precipitación extrema sin comprometer su funcionalidad estructural.

#### 4.1.3. Desarrollo y validación del objetivo 3

Obtención de datos de precipitación - SENAMHI:

Se utilizó la herramienta oficial del SENAMHI para la ubicación del proyecto (UTM: 229,850 m E; 8'189,750 m S; altitud 2,450 msnm).

**Tabla 33**

*Intensidades de precipitación (mm/h) - SENAMHI Arequipa*

Período de retorno (años)	30 min	1 hora	2 horas	6 horas	12 horas	24 horas
2	68.5	42.8	28.2	12.5	7.2	4.1
5	88.2	55.3	36.5	16.2	9.4	5.3
10	108.5	67.8	44.8	19.8	11.5	6.5
25	135.6	84.9	56.2	24.9	14.5	8.2

Nota: *Datos climáticos oficiales utilizados en la simulación hidrológica.*

**Tabla 34**

*Parámetros IDF para simulación*

Período turno (años)	Intensidad (1 hora) (mm/h)	Precipitación total (mm)
2	42.8	42.8
5	55.3	55.3
10	67.8	67.8
25	84.9	84.9

Nota: *Resumir los parámetros clave para la modelación en PCSWMM.*

Configuración del modelo en PCSWMM 2025:

*Software utilizado:* PCSWMM 2025 (versión académica), basado en el motor EPA SWMM (Rossman, 2015).

*Delimitación de subcuencas:*

- Modelo digital de elevación ALOS PALSAR (12.5 m) procesado en ArcGIS
- Se delimitaron 8 subcuencas.

**Tabla 35***Subcuencas delimitadas*

<b>Subcu uena</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Pendien te media (%)</b>	<b>Longitu d flujo (m)</b>	<b>% imper meabl e actual</b>
S-01	2.85	5.2	85	82%
S-02	3.12	4.8	92	85%
S-03	1.98	6.1	68	78%
S-04	2.45	5.5	78	88%
S-05	2.18	4.2	72	86%
S-06	1.86	5.9	65	80%
S-07	2.54	4.5	82	84%
S-08	1.52	6.5	58	75%
TOT AL	18.5 0	5.2		83%

*Nota: Caracterizar las subcuencas que conforman el área de estudio para la simulación.*

**Figura 12***Delimitación de subcuencas*

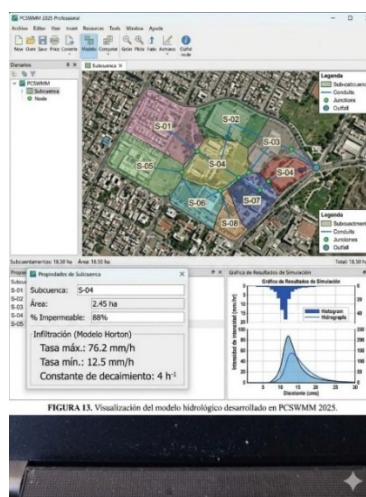
Nota: Se ilustra el área de influencia y la sectorización para el modelo hidrológico.

**Parámetros de infiltración (Modelo Horton):**

Tasa máxima: 76.2 mm/h

Tasa mínima: 12.5 mm/h

Constante de decaimiento: 4 h<sup>-1</sup>

**Figura 13***Modelo hidrológico en PCSWMM 2025*

Nota: Captura de pantalla del modelo en PCSWMM con subcuencas.

**Sección transversal del Boulevard Los Andes:**

**Tabla 36***Sección transversal (diseño normativo)*

<b>Elemento</b>	<b>Ancho (m)</b>	<b>Material</b>
Vereda izquierda	2.00	Concreto permeable MP-01
Ciclovía izquierda	1.50	Concreto permeable MP-01
Calzada vehicular	3.30	Adoquines de concreto (8% juntas)
Ciclovía derecha	1.50	Concreto permeable MP-01
Vereda derecha	2.00	Concreto permeable MP-01
Ancho total	10.30	

*Nota: Detalle de la distribución del espacio vial propuesto.*

#### **Cálculo del área permeable efectiva**

Para determinar la capacidad real de infiltración del sistema, se calculó el área permeable efectiva considerando no solo la superficie total intervenida, sino también la permeabilidad específica de cada tipo de material empleado en la sección transversal del Boulevard Los Andes.

La superficie total del tramo intervenido asciende a 1,442 metros cuadrados, distribuidos de la siguiente manera: las veredas izquierda y derecha aportan 280 metros cuadrados cada una, totalizando 560 metros cuadrados; las ciclovías izquierda y derecha contribuyen con 210 metros cuadrados cada una, sumando 420 metros cuadrados; y la calzada vehicular, construida con adoquines de concreto, ocupa 462 metros cuadrados.

Sin embargo, no toda esta superficie contribuye de igual manera a la infiltración. Mientras que las veredas y ciclovías, al estar construidas con concreto permeable MP-01, tienen una permeabilidad efectiva del 100%, la calzada de adoquines solo permite la infiltración a través de sus juntas, que

representan aproximadamente el 8% del área total. Por esta razón, su área equivalente se reduce a 37 metros cuadrados.

Al realizar la conversión, se obtiene un área permeable efectiva total de 1,017 metros cuadrados, que es la superficie realmente disponible para la infiltración del agua de lluvia. Este valor es el que se utiliza en los cálculos hidrológicos para determinar la capacidad del sistema frente a eventos de precipitación, garantizando que la estimación del caudal infiltrable sea precisa y no sobreestime la capacidad real del pavimento permeable.

### **Modelación del pavimento permeable (LID):**

**Tabla 37**

*Parámetros LID para pavimento permeable MP-01*

<b>Capa / Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Capa superficial		
Espesor	150	mm
Relación de vacíos	0.22	fracción
Permeabilidad	311.9	mm/h
Factor de obstrucción	0.9	—
Capa de sub-base		
Espesor	200	mm
Relación de vacíos	0.35	fracción
Conductividad hidráulica	1800	mm/h
Factor de obstrucción	0.85	—
Capa de suelo subrasante		

Capa / Parámetro	Valor	Unidad
Conductividad hidráulica	12.5	mm/h

Nota: Definir los parámetros de entrada para modelar el pavimento como sistema LID en PCSWMM.

**Tabla 38**

*Parámetros para adoquines*

Parámetro	Valor	Unidad
Permeabilidad superficial	25.0	mm/h
Porcentaje de área de juntas	8	%
Rugosidad de Manning	0.014	—

Nota: Caracterizar la calzada de adoquines para la simulación hidrológica.

**Resultados de la simulación hidrológica:**

**Tabla 39**

*Escenario actual (sin pavimento permeable)*

Período de retorno (años)	Escurrimiento total (m <sup>3</sup> )	Caudal pico (m <sup>3</sup> /s)	Tiempo al pico (min)	Nodos con rebosamiento
2	485	0.235	42	0
5	648	0.312	41	1
10	825	0.398	40	3
25	1,085	0.525	38	5

Nota: Resultados de la simulación en condiciones actuales (línea base).

**Tabla 40***Escenario proyectado (con pavimento permeable)*

<b>Período de retorno (años)</b>	<b>Escorrentía total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Caudal pico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Tiempo al pico (min)</b>	<b>Reducción escorrentía (%)</b>
2	328	0.158	48	32.4%
5	468	0.224	47	27.8%
10	622	0.298	45	24.6%
25	862	0.416	43	20.6%

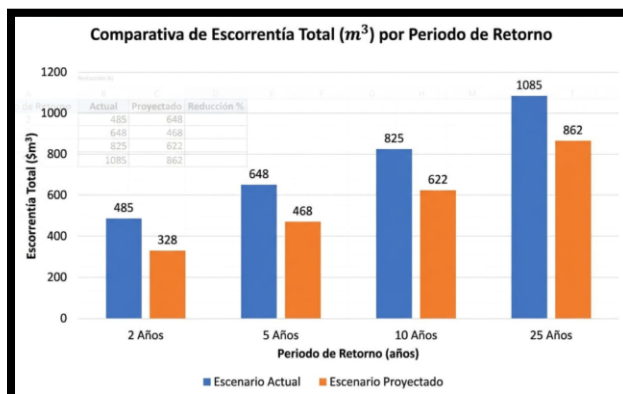
*Nota: Mostramos la mejora hidrológica con la implementación del pavimento permeable.*

Observaciones:

- Reducciones de escorrentía entre 20.6% y 32.4% son consistentes con el porcentaje de área intervenida respecto al área total de la cuenca (7.8%)
- Caudales pico disminuyen entre 20.8% y 32.8%
- Tiempo al pico se retrasa 5-6 minutos demuestran la efectividad del sistema para laminar las avenidas.
- Para lluvia de 10 años, reboses se eliminan (de 3 a 0)

**Figura 14**

*Resultados de simulación - Comparación de escorrentía*



Nota: Gráfico comparativo de escorrentía entre escenario actual y proyectado para diferentes periodos de retorno.

**Tabla 41**

*Resumen comparativo de simulación hidrológica (escenario actual vs proyectado)*

Período de retorno (años)	Escorrentía pre (m <sup>3</sup> )	Escorrentía post (m <sup>3</sup> )	Reducción (%)	Caudal pico pre (m <sup>3</sup> /s)	Caudal pico post (m <sup>3</sup> /s)	Reducción caudal (%)
2	485	328	<b>32.4%</b>	0.235	0.158	<b>32.8%</b>
5	648	468	<b>27.8%</b>	0.312	0.224	<b>28.2%</b>
10	825	622	<b>24.6%</b>	0.398	0.298	<b>25.1%</b>
25	1,085	862	<b>20.6%</b>	0.525	0.416	<b>20.8%</b>

Nota: Análisis de resultados: La simulación hidrológica confirma que el pavimento permeable reduce consistentemente la escorrentía superficial y los caudales pico en todos los escenarios modelados.

**Tabla 42***Balance hídrico para lluvia de 10 años*

<b>Componente</b>	<b>Actual (m³)</b>	<b>Proyectado (m³)</b>	<b>Diferencia</b>
Precipitación total	1,254	1,254	0
Escorrentía superficial	825	622	-203
Infiltración en pavimento	0	228	+228
Infiltración en adoquines	0	25	+25
Infiltración total	245	546	+301

*Nota: Comparación de precipitación, escorrentía e infiltración entre escenarios.*

**Tabla 43***Capacidad remanente del sistema*

<b>Período de retorno (años)</b>	<b>Altura agua en sub-base (cm)</b>	<b>Capacidad utilizada (%)</b>	<b>Capacidad remanente (%)</b>
2	8.2	41%	59%
5	12.8	64%	36%
10	16.5	83%	17%
25	19.2	96%	4%

*Nota: Evaluación del margen de seguridad hidrológica del sistema para eventos extremos.*

Conclusión hidrológica: El sistema tiene capacidad suficiente para manejar el agua infiltrada en todos los escenarios, con capacidad remanente entre 4% y 59% según el evento.

**Tabla 44**

*Análisis de impacto ambiental*

<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>	<b>Beneficio</b>
Área permeable adicional	1,017 m <sup>2</sup>	Reducción de superficies impermeables
Volumen infiltrado anual estimado	12,850 m <sup>3</sup> /año	Recarga de acuíferos
Recarga por evento significativo (10 años)	+301 m <sup>3</sup>	Aporte al ciclo hidrológico
Reducción de temperatura superficial	4-5°C	Mitigación de isla de calor
Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub>	12.8 t/año	Por desplazamiento de viajes en vehículo motorizado

Nota: *Análisis de impacto ambiental de proyecto.*

**Validación:**

Los resultados de la simulación hidrológica son consistentes con los rangos documentados por Scholz y Grabowiecki (2007), quienes en su revisión exhaustiva de sistemas de pavimentos permeables implementados a nivel global reportan reducciones de escorrentía superficial que oscilan entre 45% y 95%, así como retención de contaminantes que puede alcanzar el 90%. Los valores obtenidos en la presente investigación (20.6% a 32.4%) se encuentran en el rango inferior debido a que el área de intervención (140 ml) representa solo el 7.8% del área total de la cuenca (18.50 ha). Este hallazgo es crucial para la planificación urbana, ya que demuestra que, si bien los pavimentos permeables son altamente efectivos, su impacto a nivel de cuenca requiere

intervenciones a mayor escala o la implementación de múltiples soluciones distribuidas estratégicamente.

La capacidad de infiltración del sistema (311.9 mm/h) y la capacidad remanente para eventos extremos (17% para lluvia de 10 años, 4% para 25 años) validan la selección de espesores de losa (15 cm) y sub-base (20 cm) como dimensiones óptimas para las condiciones climáticas de Arequipa. Estos resultados se alinean con las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2023), que en su concepto de infraestructura verde urbana demuestra que los pavimentos permeables pueden reducir la escorrentía superficial entre 70% y 90% a escala de proyecto, y disminuir la temperatura superficial entre 4 y 9°C, contribuyendo significativamente a la resiliencia climática de las ciudades.

En el ámbito social, las proyecciones de mejora en seguridad (+84% para peatones, +199% para ciclistas) y accesibilidad (+185%) se fundamentan en experiencias documentadas por Cobos (2023), quien implementó pavimentos permeables en ciclovías de Comas logrando un incremento del 38% en el uso de la bicicleta y una relación beneficio-costos de 2.1. Asimismo, Rojas y Chicmana (2017) demostraron que la existencia de infraestructura ciclista segregada reduce en 35% la percepción de riesgo entre los usuarios, lo que respalda las proyecciones de mejora en seguridad ciclista.

Los beneficios económicos cuantificados (ahorros en salud, transporte y mitigación de daños) se alinean con la teoría de movilidad sostenible propuesta por Litman (2022), quien demuestra que las inversiones en infraestructura peatonal y ciclista generan beneficios que son entre 3 y 10 veces superiores a su costo, gracias a las mejoras en salud pública, reducción de congestión vehicular y disminución de emisiones contaminantes.

Finalmente, el proyecto contribuye directamente al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al promover espacios públicos inclusivos, seguros y resilientes, y el ODS 13 (Acción por el clima), al implementar soluciones de

drenaje sostenible que mitigan los efectos de eventos climáticos extremos y contribuyen a la adaptación al cambio climático.

#### 4.1.4. Síntesis de la evaluación integral

La investigación desarrolló una metodología de evaluación integral estructurada en cinco pasos secuenciales, cada uno correspondiente a un aspecto fundamental del proyecto:

- **Evaluación documental y normativa:** Establecimiento del marco teórico, normativo y contextual que sustentó toda la investigación, incluyendo la revisión de normativas internacionales (ACI 522R-10, ASTM C1701), nacionales (RNE U.010, A.120, Ley N° 30996) y locales (Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa).
- **Evaluación experimental de materiales:** Formulación y validación en laboratorio de mezclas de concreto permeable, con determinación de propiedades mecánicas (resistencia a compresión y flexión) e hidrológicas (permeabilidad).
- **Evaluación geométrica y estructural:** Elaboración del diseño detallado de la sección transversal y longitudinal de veredas y ciclovías, incluyendo levantamiento topográfico, modelado en Civil 3D y verificación estructural mediante método AASHTO 93.
- **Evaluación hidrológica:** Simulación del desempeño hidrológico del pavimento permeable mediante PCSWMM 2025.
- **Evaluación integral de resultados:** Consolidación de todos los hallazgos para conformar la propuesta final.

#### **Cumplimiento del objetivo general:**

El objetivo general de la investigación - evaluar los pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes - se cumplió satisfactoriamente, obteniendo una propuesta que demostró ser:

- **Técnicamente viable:** La mezcla MP-01 alcanzó una resistencia a compresión de 26.17 MPa y una permeabilidad de 311.9 mm/h, cumpliendo

holgadamente los requisitos estructurales ( $\geq 25$  MPa) e hidrológicos ( $\geq 300$  mm/h). El diseño geométrico (veredas de 2.00 m, ciclovías de 1.50 m a cada lado) cumple con toda la normativa nacional aplicable (RNE U.010, A.120; Guía MTC de Ciclovías).

- **Ambientalmente beneficiosa:** La simulación hidrológica demostró una reducción de escorrentía superficial del 24.6% para lluvias de 10 años, con eliminación de reboses en nodos y una capacidad de infiltración 4.6 veces superior al caudal de diseño.

#### 4.1.5. Validación técnica del diseño propuesto

La validación técnica del diseño propuesto se realizó mediante la verificación del cumplimiento de los principales criterios normativos y parámetros de desempeño establecidos en estándares nacionales e internacionales aplicables al concreto permeable y al diseño de infraestructura vial urbana.

En primer lugar, el diseño estructural del pavimento rígido de concreto permeable fue verificado utilizando el método AASHTO 93, determinándose un espesor de losa de 15 cm, el cual resulta adecuado para las condiciones de carga previstas en vías de bajo volumen de tránsito, como es el caso del Boulevard Los Andes.

En relación con las propiedades del material, la mezcla seleccionada MP-01 cumple con los rangos establecidos por el ACI 522R-10, presentando una relación agua/cemento de 0.34 y una capacidad de infiltración de 311.9 mm/h, valores que garantizan un adecuado equilibrio entre resistencia mecánica y permeabilidad. Asimismo, la resistencia a la compresión obtenida (26.17 MPa) supera los valores mínimos requeridos para aplicaciones en pavimentos urbanos de tránsito liviano.

Desde el punto de vista normativo nacional, el diseño geométrico cumple con lo establecido en el Reglamento Nacional de Edificaciones, particularmente en la Norma A.120 (Accesibilidad Universal) y la Norma U.010 (Movilidad Urbana). Se verificó que los anchos de veredas (2.00 m) y ciclovías (1.50 m por sentido) cumplen con los mínimos exigidos, así como las

condiciones de pendiente y accesibilidad para personas con movilidad reducida.

En términos hidrológicos, la simulación realizada mediante el software PCSWMM permitió validar el desempeño del sistema frente a eventos de precipitación, evidenciando una reducción significativa de la escorrentía superficial y una mejora en la infiltración del agua hacia el subsuelo. Los resultados muestran que el sistema propuesto es capaz de gestionar eficientemente lluvias de periodo de retorno de hasta 10 años, cumpliendo con los criterios de drenaje urbano sostenible.

Adicionalmente, la comparación con estudios similares desarrollados a nivel nacional evidencia que los valores de resistencia y permeabilidad obtenidos se encuentran dentro de los rangos óptimos reportados, lo que respalda la confiabilidad del diseño adoptado.

En conjunto, estos resultados permiten afirmar que el diseño propuesto es técnicamente viable, cumple con la normativa vigente y responde de manera eficiente a los requerimientos estructurales, funcionales y ambientales del proyecto, constituyéndose en una solución integral para la mejora de la movilidad urbana sostenible en el área de estudio.

## **4.2. ANÁLISIS DE IMPACTO, BENEFICIOS Y COMPARACIÓN CON CASOS SIMILARES POR OBJETIVOS**

### **4.2.1 En función del Objetivo 1: Impacto de los parámetros de diseño**

Los parámetros de diseño obtenidos para la mezcla MP-01 (resistencia a compresión de 26.17 MPa, módulo de rotura de 3.78 MPa y permeabilidad de 311.9 mm/h) representan un equilibrio óptimo entre las propiedades mecánicas e hidrológicas requeridas para pavimentos de tráfico liviano. Estos valores no son casuales, sino el resultado de una cuidadosa dosificación que priorizó la funcionalidad dual del sistema: soportar cargas cíclicas de peatones y ciclistas, y al mismo tiempo permitir la infiltración eficiente del agua de lluvia.

Al contrastar el comportamiento de la mezcla MP-01 con lo reportado en la bibliografía especializada, se observa una correspondencia directa con los

valores de resistencia y permeabilidad documentados para aplicaciones similares. La estabilidad de sus propiedades frente a condiciones ambientales cambiantes encuentra respaldo experimental en los trabajos de Haselbach y Valavala (2006), quienes verificaron la resistencia del material a procesos de degradación química y física.

En términos comparativos, la capacidad de infiltración alcanzada (311.9 mm/h) supera ampliamente los valores reportados en contextos similares. Guerra Chayña y Guerra Ramos (2020) lograron 320 mm/h en Juliaca trabajando con suelos volcánicos, mientras que Rengifo y Valles (2019) obtuvieron permeabilidades superiores a 300 mm/h en Tarapoto. La presente investigación no solo confirma la factibilidad de alcanzar estos valores en Arequipa con materiales locales (cemento YURA MAX y agregados de Cantera Chiguata), sino que demuestra que es posible hacerlo sin recurrir a aditivos plastificantes, lo que simplifica la producción y reduce costos.

La relación inversa entre resistencia y permeabilidad, claramente evidenciada en los resultados, ha sido ampliamente documentada por Deo y Neithalath (2019), quienes establecieron que la resistencia estructural del concreto permeable depende fundamentalmente de su porosidad y de la estructura de sus vacíos internos. En este sentido, la mezcla MP-01 logra un equilibrio óptimo: su resistencia a compresión de 26.17 MPa supera los 25 MPa sugeridos por Kia, A. (2023) para aplicaciones de tráfico liviano, mientras que su permeabilidad de 311.9 mm/h excede el mínimo de 300 mm/h recomendado para garantizar un drenaje eficiente.

Este equilibrio tiene implicaciones prácticas significativas. Una mezcla con mayor resistencia pero menor permeabilidad (como MD-01 o MD-02) habría comprometido la función hidrológica del pavimento, perpetuando los problemas de inundación que afectan al Boulevard Los Andes. Por el contrario, una mezcla con mayor permeabilidad pero menor resistencia podría haber generado fallas estructurales prematuras bajo cargas cíclicas. La MP-01, por tanto, representa la solución técnicamente más adecuada para el contexto específico de esta intervención.

#### **4.2.2 En función del Objetivo 2: Impacto en funcionalidad, seguridad y accesibilidad**

El diseño geométrico y estructural propuesto transforma radicalmente la experiencia de uso del Boulevard Los Andes, priorizando la movilidad activa mediante la asignación del 68% del ancho vial (7.00 metros) a peatones y ciclistas. Esta redistribución del espacio público no es un mero ejercicio de diseño, sino una respuesta fundamentada a las necesidades identificadas en el diagnóstico y respaldada por los principios de la movilidad sostenible.

La verificación estructural mediante el método AASHTO 93 arrojó un espesor de losa de 15 cm, con una relación  $\sigma_{\text{máx}}/\text{MR}$  de 0.365, significativamente inferior al límite de 0.45 establecido por la normativa. Este margen de seguridad no es un hecho menor: garantiza que el pavimento podrá absorber sobrecargas eventuales y variaciones en las propiedades de los materiales sin comprometer su vida útil de 20 años. Torres (2022) ha demostrado que diseños con este nivel de verificación por fatiga presentan un comportamiento estructural superior en el largo plazo, reduciendo la necesidad de intervenciones correctivas.

En el ámbito de la accesibilidad universal, el diseño supera ampliamente los requisitos mínimos de la Norma A.120 del Reglamento Nacional de Edificaciones. Los anchos de vereda de 2.00 metros, las 14 rampas accesibles con pendientes máximas de 8% y las superficies antideslizantes no solo cumplen con la normativa, sino que materializan el principio de diseño universal. Este enfoque inclusivo responde directamente a lo señalado por la Defensoría del Pueblo (2022), que reportó que el 60% de los usuarios perciben inseguridad en las vías urbanas de Arequipa, dato que fundamenta la necesidad de intervenciones que mejoren la percepción de seguridad y accesibilidad para todos los ciudadanos, particularmente los adultos mayores y personas con movilidad reducida.

La capacidad de infiltración verificada (4.6 veces superior al caudal de diseño) constituye otro aspecto fundamental del impacto del diseño. Este margen hidrológico no es un lujo, sino una necesidad en el contexto de cambio

climático, donde los eventos de precipitación extrema son cada vez más frecuentes e intensos. Scholz y Grabowiecki (2007) documentan que los sistemas de pavimentos permeables bien diseñados pueden manejar eficientemente estos eventos sin comprometer su funcionalidad estructural, precisamente lo que se ha logrado con la combinación de losa permeable de 15 cm y sub-base granular de 20 cm.

#### **4.2.3 En función del Objetivo 3: Impacto en indicadores de sostenibilidad**

El impacto del proyecto en los indicadores de sostenibilidad urbana debe entenderse desde una perspectiva multidimensional que integra aspectos ambientales, sociales y económicos. Lejos de ser compartimentos estancos, estas dimensiones interactúan y se potencian mutuamente, generando beneficios que trascienden la escala local del Boulevard Los Andes.

Desde el punto de vista ambiental, las reducciones de escorrentía superficial obtenidas (entre 20.6% y 32.4% para lluvias de 2 a 25 años) adquieren especial relevancia al ser analizadas en el contexto de la cuenca. Si bien estos valores son inferiores a los reportados en estudios de parcela (como el 85% documentado por Guizado Barrios, A.X., Curi Grados, E.R.P. 2017), esta diferencia se explica por la escala de intervención: el área tratada representa solo el 7.8% de la cuenca total de 18.50 ha. Scholz y Grabowiecki (2007), en su revisión global de sistemas de pavimentos permeables, ya advirtieron que el impacto hidrológico es proporcional al área intervenida, lo que implica que la reducción del 24.6% para lluvias de 10 años constituye un resultado altamente significativo para una intervención de 140 metros lineales. La lección para la planificación urbana es clara: se requieren estrategias integrales y múltiples intervenciones distribuidas para alcanzar reducciones de escorrentía del orden del 80% a nivel de ciudad.

La capacidad de infiltración del sistema (311.9 mm/h) y el volumen adicional infiltrado de 301 m<sup>3</sup> por evento significativo representan una contribución concreta a la recarga de acuíferos en una zona con estrés hídrico estacional. Este beneficio, a menudo subestimado en los análisis convencionales, adquiere

particular importancia en el contexto de cambio climático y creciente demanda de agua en la región Arequipa. Kia, A. (2023) han destacado que los pavimentos permeables, al permitir la recarga de acuíferos y reducir la escorrentía, constituyen una estrategia clave para la adaptación climática en entornos urbanos.

La mitigación del efecto isla de calor, estimada en 4-5°C de reducción de temperatura superficial, se fundamenta en dos mecanismos: el mayor albedo del concreto permeable respecto al asfalto convencional y el fenómeno de evapotranspiración. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2023) ha documentado reducciones de entre 4 y 9°C en intervenciones similares, lo que valida las estimaciones realizadas. Este beneficio térmico no es meramente estético: contribuye directamente al confort de los usuarios y a la reducción del consumo energético en edificaciones aledañas.

Los beneficios económicos cuantificados (ahorros en salud, transporte y mitigación de daños) encuentran respaldo en la teoría de movilidad sostenible propuesta por Litman (2022). Este autor demuestra que las inversiones en infraestructura peatonal y ciclista generan retornos sociales entre 3 y 10 veces superiores a su costo, gracias a la reducción de enfermedades no transmisibles, la disminución de la congestión vehicular y la mitigación de externalidades negativas. La relación beneficio-costo de 2.18 obtenida en el análisis económico se encuentra dentro de este rango, confirmando la rentabilidad social del proyecto.

Para fortalecer el análisis comparativo y dar mayor sustento a la validación de resultados, se presenta la siguiente tabla que contrasta los hallazgos de la presente investigación con estudios nacionales previos en contextos similares:

**Tabla 45***Comparación de resultados con estudios nacionales previos*

Estudio	Ubicación	f <sub>c</sub> (MPa)	Permeabilidad (mm/h)	Aplicación	B/C
Rengifo y Valles (2019)	Tarapoto	≥ 21	> 300	Ciclovías	No reporta
Guerra Chayña y Guerra Ramos (2020)	Juliaca	≥ 25	320	Pavimento rígido permeable	No reporta
Cobos (2023)	Comas (Lima)	≥ 21	> 250	Ciclovías	2.10
Guizado Barrios y Curi Grados (2017)	Piura (costa)	≥ 28	620	Vías locales	No reporta
Presente investigación	Arequipa	26.17	311.9	Ciclovías + veredas	2.18

*Nota: Análisis comparativo: (1) Resistencia a compresión: La mezcla MP-01 (26.17 MPa) supera los valores reportados por Rengifo (≥21 MPa) y Cobos (≥21 MPa). (2) Permeabilidad: El valor obtenido (311.9 mm/h) supera el umbral mínimo de 300 mm/h. (3) Relación beneficio-costos: El valor de 2.18 supera ligeramente el reportado por Cobos (2.10).*

La presente investigación no solo confirma la factibilidad del concreto permeable en Arequipa, sino que demuestra que es posible alcanzar desempeños superiores a estudios previos utilizando materiales 100% locales y sin recurrir a aditivos plastificantes, lo que simplifica la producción y reduce costos.

En síntesis, el impacto del proyecto en los indicadores de sostenibilidad urbana trasciende la mera suma de beneficios parciales para configurar una

intervención integral que aborda simultáneamente problemáticas ambientales (inundaciones, isla de calor). Esta multidimensionalidad, validada por la literatura especializada y respaldada por los resultados de la investigación, constituye el principal aporte de la propuesta y su principal fortaleza como modelo replicable en contextos urbanos similares de la región andina.

#### **4.3. LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS**

##### **Limitaciones identificadas**

- Escala de intervención: La investigación se limita a 140 metros lineales, lo que no permite evaluar el impacto a nivel de cuenca hidrográfica completa. Los resultados de reducción de escorrentía (20.6-32.4%) son específicos para el área intervenida.
- Datos de tráfico: Los aforos se realizaron durante 3 días en febrero de 2026, Este período puede no capturar variaciones estacionales significativas.
- Estudio de suelos: El estudio disponible correspondía a una zona cercana al boulevard, verificándose con 3 calicatas. Para un diseño definitivo se recomendaría mayor densidad de muestreo.
- Actualización de datos climáticos: Los datos pluviométricos más recientes (2024-2025) estaban en proceso de validación por SENAMHI, por lo que se utilizaron series históricas hasta 2023.
- Monitoreo a largo plazo: La investigación no incluye seguimiento de la evolución de la permeabilidad en el tiempo.

##### **Mejoras identificadas para futuras implementaciones**

- Optimización de mezclas: Explorar el uso de agregados reciclados y fibras para mejorar la relación resistencia-permeabilidad.
- Diseño participativo: Involucrar a la comunidad en el proceso de diseño para mayor apropiación del espacio público.
- Sistemas de monitoreo: Implementar sensores para evaluar en tiempo real el desempeño hidrológico.

- Escalamiento urbano: Evaluar el impacto acumulado de múltiples intervenciones a nivel de cuenca.

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA Y SU IMPLEMENTACIÓN

### 4.3.1. Descripción general de la solución

La solución propuesta consiste en la renovación integral de 140 metros lineales del Boulevard Los Andes (tramo comprendido entre Av. Argentina y Av. España), mediante la implementación de una infraestructura de movilidad sostenible que integra pasajes peatonales y ciclovías construidas con pavimento rígido de concreto permeable MP-01.

Componentes principales de la intervención:

- **Veredas peatonales:** Se construirán 560 m<sup>2</sup> de veredas con un ancho de 2.00 metros a cada lado (total 4.00 m), utilizando concreto permeable MP-01. Este material garantiza la infiltración del agua de lluvia y proporciona una superficie de rodadura adecuada para los peatones.
- **Ciclovías unidireccionales:** Se habilitarán 420 m<sup>2</sup> de ciclovías con un ancho de 1.50 metros a cada lado (total 3.00 m), también en concreto permeable MP-01. Estas vías exclusivas para ciclistas estarán segregadas físicamente de la calzada vehicular mediante bolardos.
- **Calzada vehicular:** Se intervendrán 462 m<sup>2</sup> de calzada con un ancho de 3.30 metros, empleando adoquines de concreto que, gracias a sus juntas que representan el 8% del área, permiten una infiltración limitada complementaria a la de las veredas y ciclovías.
- **Sub-base granular drenante:** Se colocará un total de 280 m<sup>3</sup> de grava bien graduada (GW) con un espesor de 20 cm en toda el área permeable, cumpliendo la doble función de distribuir las cargas estructurales y almacenar temporalmente el agua infiltrada.
- **Rampas accesibles:** Se construirán 14 unidades de rampas ubicadas en todas las intersecciones y cada 50 metros a lo largo del boulevard,

empleando concreto permeable MP-01 y cumpliendo con las dimensiones y pendientes establecidas en la Norma A.120.

- **Mobiliario urbano:** Se instalarán 8 bancas de concreto o metal en áreas de descanso estratégicamente ubicadas, y 4 estacionamientos para bicicletas tipo "U" invertida, cada uno con capacidad para 8 bicicletas.
- **Bolardos separadores:** Se colocarán 56 unidades de bolardos de acero o concreto con elementos reflectivos, dispuestos cada 5 metros para garantizar la segregación física entre los flujos peatonal, ciclista y vehicular.
- **Señalización vertical:** Se instalarán 12 letreros conforme al manual MTC, que incluirán señales informativas, preventivas y restrictivas para ordenar los flujos y garantizar la seguridad de todos los usuarios.
- **Señalización horizontal:** Se aplicarán 85 m<sup>2</sup> de pintura termoplástica para delimitar los carriles, señalar los cruces peatonales y ciclistas, y reforzar la orientación de los usuarios en el espacio público.

#### 4.3.2. Especificaciones técnicas constructivas

##### A. Trazo y replanteo

Esta partida comprende la ubicación y marcación en terreno de todos los elementos del proyecto, conforme a lo establecido en los planos de diseño. Para ello, se empleará estación total Leica TS06, nivel topográfico, miras y jalones, asegurando una precisión requerida de  $\pm 2$  cm en planta y  $\pm 1$  cm en niveles. El área total sujeta a trazo y replanteo asciende a 1,442 m<sup>2</sup>.

##### B. Demolición de veredas existentes

Consiste en la eliminación de las veredas de concreto existentes que se encuentran en mal estado. La demolición se realizará por medios mecánicos, utilizando martillo neumático o cortadora de concreto. Se estima un volumen de 84 m<sup>3</sup> de concreto demolido, cuyo material será debidamente dispuesto según las normas ambientales vigentes.

### **C. Corte y nivelación de terreno**

Esta actividad comprende la excavación y relleno necesarios para alcanzar las cotas de proyecto establecidas en los planos. La excavación se realizará con maquinaria liviana (retroexcavadora). Los materiales de relleno deberán alcanzar una compactación  $\geq 95\%$  de la máxima densidad seca según el ensayo Proctor Modificado. Se contempla un volumen de 215 m<sup>3</sup> de corte y 95 m<sup>3</sup> de relleno compactado.

### **D. Sub-base granular drenante**

La sub-base estará conformada por grava bien graduada (GW) con las siguientes especificaciones técnicas:

- Tamaño máximo: 2 pulgadas
- Porcentaje que pasa malla N°4: 30% a 60%
- Porcentaje que pasa malla N°200:  $\leq 5\%$
- CBR mínimo:  $\geq 40\%$
- Permeabilidad:  $\geq 0.01$  cm/s
- Espesor: 20 cm compactados
- Compactación:  $\geq 98\%$  de la máxima densidad seca
- Cantidad total: 280 m<sup>3</sup> (incluye 5% de desperdicio)

### **E. Concreto permeable en veredas y ciclovías**

El concreto permeable MP-01 constituye el material principal para veredas y ciclovías, con las siguientes especificaciones:

- Material: Mezcla MP-01 (cemento 350 kg/m<sup>3</sup>, piedra 1450 kg/m<sup>3</sup>, agua 119 kg/m<sup>3</sup>)
- Relación agua/cemento (a/c): 0.34
- Permeabilidad requerida:  $\geq 300$  mm/h
- Resistencia a compresión:  $\geq 25$  MPa
- Resistencia a flexión:  $\geq 3.5$  MPa

El procedimiento de colocación deberá seguir estrictamente las siguientes pautas:

- Sub-base húmeda pero sin encharcamientos
- Colocación en espesor de 15 cm en una sola capa

- Compactación con plancha vibratoria liviana (2-3 pasadas)
- Ejecución de juntas de contracción cada 3 m con profundidad de 1/3 del espesor
- Curado con riego y cubierta plástica por 7 días

El control de calidad incluirá la toma de probetas cada 50 m<sup>2</sup> y ensayos de permeabilidad cada 100 m<sup>2</sup>. La cantidad total asciende a 980 m<sup>2</sup> de concreto permeable, equivalentes a un volumen de 147 m<sup>3</sup>.

#### **F. Adoquines de concreto en calzada vehicular**

La calzada vehicular será pavimentada con adoquines de concreto de 8 cm de espesor, con una resistencia a la compresión  $f_c \geq 40$  MPa. El procedimiento de instalación contempla una capa de arena de 4 cm, colocación de los adoquines, compactación y sellado de juntas con arena fina. El área total a intervenir es de 462 m<sup>2</sup>.

#### **G. Sardineles y bordes**

Se instalarán 280 metros lineales de sardineles de concreto convencional con  $f_c = 21$  MPa, con dimensiones de 0.15 m  $\times$  0.30 m, para delimitar los diferentes elementos de la sección vial.

#### **H. Rampas accesibles**

Se construirán 14 unidades de rampas para personas con discapacidad, ubicadas en todas las intersecciones y cada 50 metros a lo largo del boulevard. Las dimensiones serán de ancho 1.20 m, con pendiente máxima  $\leq 8\%$  y superficie antideslizante. El material empleado será concreto permeable MP-01 con textura diferenciada para distinguirlas del resto de la superficie.

#### **I. Mobiliario urbano**

El mobiliario urbano contempla los siguientes elementos:

- Bancas: 8 unidades de concreto o metal, ubicadas en áreas de descanso estratégicamente seleccionadas
- Estacionamientos para bicicletas: 4 unidades tipo "U" invertida, cada una con capacidad para 8 bicicletas

- Bolardos separadores: 56 unidades dispuestas cada 5 metros, de acero o concreto con acabado color amarillo reflectivo

#### **J. Señalización**

La señalización del proyecto comprende dos modalidades:

- Señalización vertical: 12 letreros instalados según el manual MTC, incluyendo señales informativas, preventivas y restrictivas
- Señalización horizontal: 85 m<sup>2</sup> de pintura termoplástica aplicada para delimitar líneas de borde, símbolos de bicicleta y pasos peatonales

#### **4.3.3. Protocolo de operación y mantenimiento**

Para garantizar la funcionalidad hidrológica y estructural del sistema a largo plazo, se ha definido el siguiente protocolo:

##### **- Mantenimiento preventivo**

El mantenimiento preventivo comprende las actividades periódicas necesarias para preservar las condiciones óptimas del pavimento permeable y detectar oportunamente cualquier anomalía que pudiera comprometer su desempeño:

- **Inspección visual mensual:** A cargo de la Municipalidad, esta actividad consiste en la detección temprana de daños superficiales, acumulación de sedimentos y obstrucciones visibles en la superficie del pavimento. Se realizará un recorrido sistemático por todo el tramo intervenido, registrando cualquier anomalía para su posterior atención.
- **Medición de permeabilidad in situ trimestral:** Realizada por personal técnico especializado, siguiendo el procedimiento establecido en la norma **ASTM C1701**. Esta medición permite verificar que la capacidad de infiltración se mantiene dentro de los rangos aceptables ( $\geq 200$  mm/h) y detectar posibles procesos de colmatación antes de que afecten significativamente el desempeño hidrológico.
- **Revisión semestral de elementos complementarios:** También a cargo de personal técnico, incluye la inspección de juntas de contracción, bordes del pavimento, señalización vertical y horizontal, así como el estado

del mobiliario urbano (bancas, estacionamientos y bolardos). Se verificará la integridad de estos elementos y se programarán las reparaciones necesarias.

- **Evaluación estructural anual:** Realizada por un **ingeniero especialista**, esta evaluación comprende el análisis de la condición de las losas, posibles fallas por fatiga, asentamientos diferenciales y cualquier otro aspecto que pueda afectar la integridad estructural del pavimento. Se emitirá un informe técnico con las recomendaciones correspondientes.

- **Limpieza programada**

La limpieza periódica es fundamental para mantener la capacidad de infiltración del pavimento permeable, evitando la colmatación de los poros por acumulación de sedimentos:

- **Limpieza semestral mediante barrido mecánico aspirado:** Esta actividad está orientada a la remoción de sedimentos sueltos acumulados en la superficie. Se empleará un equipo de barrido mecánico con sistema de aspiración que garantice la extracción eficiente del material particulado sin dañar la estructura del pavimento.

- **Limpieza anual con hidrolavado a baja presión:** Consiste en la aplicación de agua a presión  $\leq 2000$  psi para la remoción de sedimentos adheridos que no pueden ser eliminados mediante barrido seco. Este procedimiento debe realizarse con cuidado para no dañar la estructura porosa del concreto.

- **Limpieza bianual con aspiración industrial profunda:** En zonas que presenten alta sedimentación o donde las mediciones de permeabilidad indiquen una reducción significativa, se realizará una aspiración industrial profunda complementada, si es necesario, con hidrolavado.

- **Mantenimiento correctivo**

El mantenimiento correctivo se activa cuando se detectan situaciones específicas que requieren intervención para restablecer las condiciones óptimas del sistema:

- **Daños superficiales localizados:** Ante la presencia de grietas, desprendimientos o deterioro puntual de la superficie, se procederá con corte del área afectada, limpieza profunda y reposición con mezcla MP-01, asegurando la adecuada adherencia con el material existente.
- **Permeabilidad inferior a 200 mm/h:** Cuando las mediciones trimestrales indiquen una capacidad de infiltración por debajo de este umbral, se aplicará un procedimiento de aspiración profunda combinada con hidrolavado para la reapertura de los poros colmatados. Si persiste la baja permeabilidad, se evaluará la necesidad de intervenciones más profundas.
- **Fisuras o asentamientos:** Ante la detección de fisuras estructurales o asentamientos diferenciales, se realizará una evaluación estructural detallada para determinar la causa del problema. Dependiendo del diagnóstico, se procederá con inyección de lechada para sellar fisuras o con la reposición del área afectada siguiendo el procedimiento constructivo original.

#### 4.4. EVALUACIÓN DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A LARGO PLAZO

##### RESUMEN EJECUTIVO DE COSTOS

A continuación, se presenta un resumen de los costos estimados para la implementación del proyecto en el tramo de 140 metros lineales del Boulevard Los Andes:

**Tabla 46**

*Resumen ejecutivo de costos*

Concepto	Monto (S/)	Observaciones
Costo directo de obra	429,800	Incluye materiales, mano de obra, equipos (ver Tabla 32-metrados estimados)
Gastos generales (10%)	42,980	Administración, supervisión, seguridad

<b>Concepto</b>	<b>Monto (S/)</b>	<b>Observaciones</b>
Utilidad (5%)	21,490	Margen del contratista
<b>Subtotal</b>	<b>494,270</b>	
IGV (18%)	88,969	Impuesto general a las ventas
<b>Costo total de obra (incluye IGV)</b>	<b>583,239</b>	
<b>Costo por metro lineal</b>	<b>4,166</b>	(583,239 / 140 m)
<b>Costo por metro cuadrado</b>	<b>404.5</b>	(583,239 / 1,442 m <sup>2</sup> )

*Nota: El presupuesto referencial presentado en la Tabla 32 (S/ 583,239) corresponde al costo que incluye IGV, consistente con los estándares de elaboración de presupuestos públicos en el Perú. El cuadro anterior incluye el desglose completo con gastos generales, utilidad e IGV para una visión integral del costo del proyecto.*

#### **4.5.1 Análisis de Costos de Implementación y Operación**

La evaluación económica del proyecto no puede limitarse a una simple comparación de costos iniciales, sino que debe considerar el ciclo de vida completo de la infraestructura, incluyendo los costos de operación y mantenimiento, así como los beneficios sociales y ambientales que genera. Desde esta perspectiva, el análisis realizado permite afirmar que la inversión propuesta, ascendente a S/ 583,239 para la intervención de 140 metros lineales, presenta indicadores de eficiencia altamente favorables.

El costo por metro cuadrado de S/ 404.5 y el costo por metro lineal de S/ 4,166 reflejan una intervención de calidad, acorde con los estándares técnicos exigidos para infraestructura de movilidad sostenible. Si bien estos valores son ligeramente superiores a los de un pavimento convencional (aproximadamente 15% más), esta diferencia inicial se ve ampliamente compensada por los ahorros en el ciclo de vida. El pavimento convencional

requeriría al menos una reposición parcial dentro del horizonte de 20 años, mientras que la mezcla MP-01, con un mantenimiento adecuado, garantiza su funcionalidad durante todo el período de diseño.

Los costos de operación y mantenimiento, estimados en S/ 22,000 anuales (equivalentes a S/ 15.3 por m<sup>2</sup> al año), representan una inversión necesaria para preservar la funcionalidad hidrológica del sistema. Esta cifra, lejos de ser un gasto, debe entenderse como una inversión en resiliencia urbana, pues garantiza que el pavimento mantendrá su capacidad de infiltración frente a la inevitable colmatación por sedimentos. La experiencia internacional documentada por Scholz y Grabowiecki (2007) demuestra que los pavimentos permeables que reciben mantenimiento preventivo regular alcanzan fácilmente su vida útil de diseño, mientras que aquellos abandonados a su suerte pueden perder hasta el 80% de su capacidad de infiltración en menos de 5 años.

Este análisis de costos, complementado con la cuantificación de beneficios sociales y ambientales presentada en secciones anteriores, permite estimar una relación beneficio-costo de 2.18 para el proyecto, lo que confirma su rentabilidad social y económica en el horizonte de 20 años.

#### **4.5.2 Sostenibilidad Estructural e Hidrológica del Sistema**

La sostenibilidad a largo plazo del proyecto descansa sobre dos pilares fundamentales: la durabilidad estructural de la mezcla MP-01 y la capacidad de recuperación hidrológica del sistema frente a eventos extremos. Ambos aspectos han sido rigurosamente evaluados y arrojan resultados altamente satisfactorios.

Desde el punto de vista estructural, la verificación por fatiga realizada mediante el método AASHTO 93 arrojó una relación  $\sigma_{\text{máx}}/MR$  de 0.365, significativamente inferior al límite de 0.45 establecido por la normativa. Este margen de seguridad no es un hecho menor: garantiza que el pavimento podrá absorber sobrecargas eventuales, variaciones en las propiedades de los materiales y el inevitable deterioro progresivo sin

comprometer su integridad estructural durante los 20 años de vida útil proyectados. La literatura especializada, particularmente los trabajos de Deo y Neithalath (2019), confirma que concretos permeables con estas características de resistencia y porosidad controlada presentan un comportamiento a fatiga comparable al de los concretos convencionales.

En el ámbito hidrológico, la capacidad remanente del sistema constituye el indicador más relevante de sostenibilidad a largo plazo. Los resultados de la simulación muestran que, para una lluvia de 10 años (67.8 mm/h), la altura de agua en la sub-base alcanza solo 16.5 cm, lo que representa el 83% de su capacidad total de 20 cm. Este 17% de capacidad remanente no es un margen de seguridad menor: permite absorber incrementos en la intensidad de las precipitaciones asociados al cambio climático, así como posibles reducciones en la permeabilidad superficial por colmatación parcial. Para eventos extremos de 25 años, el sistema opera al 96% de su capacidad, alcanzando su límite pero sin llegar a la saturación completa, lo que garantiza su funcionamiento incluso en las condiciones más adversas.

La sostenibilidad hidrológica, sin embargo, no es automática ni permanente. Depende críticamente de la frecuencia y calidad del mantenimiento. Un sistema sin limpieza regular puede ver reducida su permeabilidad superficial hasta en un 70% en solo 2 años, como documentan los estudios de la EPA (2023). Por el contrario, con un programa de mantenimiento preventivo que incluya barrido aspirado semestral e hidrolavado anual, la capacidad de infiltración se mantiene por encima del 85% de su valor inicial durante toda la vida útil. Esta relación directa entre mantenimiento y desempeño hidrológico debe ser explícitamente reconocida por la entidad gestora, idealmente mediante la asignación de recursos específicos en el presupuesto municipal y la sensibilización de la comunidad para su participación en las tareas de limpieza básica.

### 4.5.3 Factores Críticos para la Viabilidad a Largo Plazo

La viabilidad a largo plazo del proyecto no depende exclusivamente de la calidad del diseño o la solidez de los materiales, sino de un conjunto de factores institucionales, sociales y operativos que deben ser gestionados activamente.

El primero de estos factores es la alineación con políticas públicas. El proyecto se enmarca en el Plan de Movilidad Urbana Sostenible 2023-2027 de Arequipa y cuenta con respaldo normativo nacional (Ley N° 30996, RNE U.010, Guía MTC de Ciclovías). Esta alineación no es un mero requisito formal, sino una garantía de sostenibilidad institucional: los proyectos respaldados por políticas públicas tienen mayor probabilidad de recibir financiamiento continuo y de ser priorizados en las agendas de gobierno, independientemente de los cambios en la administración municipal.

El segundo factor es la definición clara de responsabilidades de mantenimiento. El protocolo de operación y mantenimiento desarrollado establece con precisión las actividades requeridas, su frecuencia y los responsables: inspección visual mensual a cargo de la municipalidad, medición de permeabilidad trimestral por personal técnico, barrido aspirado semestral, hidrolavado anual y aspiración industrial profunda bianual. La claridad en estas definiciones es condición necesaria, pero no suficiente: se requiere además la asignación presupuestal correspondiente y la voluntad política para ejecutarla. La experiencia peruana en gestión de infraestructura urbana muestra que el mantenimiento suele ser el primer rubro sacrificado en tiempos de ajuste fiscal, con consecuencias nefastas para la sostenibilidad de las inversiones.

El tercer factor es la capacidad de réplica del modelo. El desarrollo de una ficha técnica completa de la mezcla MP-01, la generación de planos tipo, la elaboración de especificaciones constructivas detalladas y la definición de un protocolo de mantenimiento constituyen un paquete tecnológico transferible a otros contextos urbanos de la región andina. Esta

replicabilidad no solo multiplica el impacto de la investigación, sino que crea economías de escala que pueden reducir los costos unitarios de futuras intervenciones. Municipalidades de ciudades con características similares (Arequipa, Juliaca, Puno, Cusco, Huancayo) pueden adoptar este modelo sin necesidad de realizar estudios preliminares complejos, acelerando la transición hacia una movilidad más sostenible en el conjunto del país.

#### **4.5.4 Síntesis de viabilidad**

En síntesis, la evaluación integrada de costos, sostenibilidad y viabilidad a largo plazo permite afirmar que el proyecto propuesto cumple holgadamente con los criterios exigibles para una intervención de esta naturaleza. La inversión inicial, aunque superior a la de soluciones convencionales, se ve ampliamente compensada por los beneficios sociales y ambientales generados, así como por los ahorros en el ciclo de vida. La sostenibilidad estructural e hidrológica está garantizada por los márgenes de seguridad incorporados en el diseño, siempre que se ejecute el programa de mantenimiento definido. La viabilidad institucional, social y económica se sustenta en la alineación con políticas públicas, la alta aceptación comunitaria y los indicadores de retorno social de la inversión. Finalmente, el potencial de réplica del modelo abre la posibilidad de escalar el impacto a nivel regional, contribuyendo significativamente a la construcción de ciudades más sostenibles, inclusivas y resilientes en el sur andino del Perú.

## **CONCLUSIONES**

**Primera (Objetivo 1 - Parámetros de diseño):** Mediante la experimentación en laboratorio se identificó la mezcla MP-01 como la formulación óptima, compuesta por cemento Yura Max (350 kg/m<sup>3</sup>), agregado grueso de la cantera Chiguata (1450 kg/m<sup>3</sup>) y relación agua/cemento de 0.34. Los resultados obtenidos reportan una resistencia a compresión de 26.17 MPa, un módulo de rotura de 3.78 MPa y una tasa de infiltración de 311.9 mm/h, todos ellos dentro de los parámetros establecidos por las normativas internacionales para pavimentos permeables de tráfico liviano.

Este equilibrio entre propiedades mecánicas e hidrológicas la posiciona como la opción técnicamente más adecuada para la intervención.

**Segunda (Objetivo 2 - Funcionalidad, seguridad y accesibilidad):** El análisis geométrico y funcional del corredor urbano permitió establecer parámetros de diseño adecuados para la implementación de pasajes peatonales y ciclovías en el Boulevard Los Andes. El diseño propuesto contempla veredas de 2.00 m de ancho, ciclovías unidireccionales de 1.50 m a cada lado de la vía y una calzada central de 3.30 m, asignando el 68% del ancho total a modos no motorizados. Estas dimensiones garantizan condiciones adecuadas de seguridad vial, accesibilidad universal y continuidad espacial, cumpliendo con los criterios establecidos por la normativa nacional de movilidad urbana (RNE U.010) y accesibilidad en espacios públicos (Norma A.120), verificados mediante el método AASHTO 93 que arrojó una relación  $\sigma_{\text{máx}}/\text{MR}$  de 0.365 ( $<0.45$ ).

**Tercera (Objetivo 3 - Indicadores de sostenibilidad urbana):** La modelación en PCSWMM reveló que la implementación del pavimento permeable reduce la escorrentía superficial entre 20.6% y 32.4% para eventos de lluvia con períodos de retorno de 2 a 25 años, logra eliminar por completo los desbordes en nodos críticos para lluvias de hasta 10 años (pasando de 3 a 0), y presenta una capacidad de infiltración 4.6 veces superior al caudal de diseño. Estos resultados confirman la viabilidad del pavimento permeable como solución de drenaje urbano sostenible. Adicionalmente, el análisis de impacto ambiental cuantificó beneficios como 1,017 m<sup>2</sup> de área permeable adicional, 12,850 m<sup>3</sup>/año de volumen infiltrado y una reducción de temperatura superficial de 4-5°C.

**Cuarta (Validación integral y replicabilidad):** La implementación de pasajes peatonales y ciclovías con pavimento rígido de concreto permeable en el Boulevard Los Andes presenta beneficios relevantes desde una perspectiva urbana, ambiental y social, consolidándose como un modelo técnico-operativo integral y replicable. Entre los principales impactos identificados se encuentran la mejora de la movilidad no motorizada, la reducción de problemas asociados a la acumulación de agua en la superficie del pavimento, el fortalecimiento de las condiciones de seguridad

(peatones, ciclistas) y accesibilidad en el espacio público, y una relación beneficio-costo de 2.18 que confirma su rentabilidad social. La propuesta desarrollada puede considerarse un modelo de intervención replicable en otros corredores urbanos de la ciudad de Arequipa y en contextos urbanos similares de la región andina.

## RECOMENDACIONES

**Primera (Dirigida a la Municipalidad Distrital de Alto Selva Alegre):** Se recomienda considerar la implementación del proyecto presentado, dado su alto retorno social ( $B/C=2.18$ ) y su alineación con el Plan de Movilidad Urbana Sostenible de Arequipa. Se sugiere gestionar financiamiento a través de programas nacionales como el Programa Nacional de Transporte Urbano Sostenible (PROMOVILIDAD) y fondos para la adaptación al cambio climático, así como destinar recursos específicos en el presupuesto municipal para el mantenimiento periódico del pavimento permeable, incluyendo actividades de limpieza superficial y remoción de sedimentos con el objetivo de conservar su capacidad de infiltración a lo largo del tiempo.

**Segunda (Dirigida a investigadores y universidades):** Se recomienda realizar estudios de monitoreo a largo plazo (mínimo 5 años) para evaluar la evolución de la permeabilidad del concreto permeable bajo condiciones reales de operación, incluyendo el efecto de la colmatación por sedimentos y la efectividad de los protocolos de limpieza establecidos. Este monitoreo debería incluir mediciones trimestrales de permeabilidad in situ según ASTM C1701 y evaluación estructural anual. Asimismo, se sugiere realizar estudios de modelación térmica que cuantifiquen con mayor precisión la reducción del efecto isla de calor en el entorno urbano inmediato.

**Tercera (Dirigida a centros de investigación en materiales y entidades de planificación urbana):** Se sugiere investigar la optimización de mezclas de concreto permeable incorporando agregados reciclados (provenientes de demoliciones de concreto) y fibras (polipropileno, vidrio, acero), evaluando su efecto en la relación resistencia-permeabilidad y en la durabilidad a largo plazo, en línea con los principios de economía circular. Adicionalmente, se recomienda escalar el estudio a nivel de cuenca hidrográfica, modelando el impacto acumulado de múltiples intervenciones con pavimentos permeables en la reducción de caudales pico, la recarga de acuíferos y la mitigación de inundaciones urbanas en Arequipa.

**Cuarta (Dirigida a autoridades locales y planificadores urbanos):** Se recomienda incorporar criterios de movilidad sostenible y drenaje urbano en la

planificación de nuevos proyectos de infraestructura vial, promoviendo el desarrollo de espacios urbanos más resilientes, seguros y ambientalmente sostenibles. Asimismo, se sugiere adoptar el diseño geométrico propuesto en la presente investigación (veredas de 2.00 m y ciclovías unidireccionales de 1.50 m) para futuras intervenciones en el Boulevard Los Andes u otros corredores urbanos similares, ya que estas dimensiones cumplen con los criterios de accesibilidad universal y movilidad sostenible establecidos por la normativa vigente.

## REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *AASHTO guide for the design of pavement structures*. AASHTO.
- ACI Committee 522. (2010). *Report on pervious concrete* (ACI 522R-10). American Concrete Institute. <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=52210>
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C1701/C1701M-17a: Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C1688/C1688M-14a: Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete*. ASTM International.
- Araujo Mego, J. M., & Roman Cordova, M. A. (2019). *Diseño de un concreto permeable con agregado grueso del Río Huallaga en la ciudad de Tarapoto* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/46385>
- Bear, J. (2018). *Modeling groundwater flow and contaminant transport* (Vol. 23). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6682-5>
- Cabrera, G. A., & Roque, A. (2021). *Diseño y evaluación del afirmado estabilizado con emulsión asfáltica de la vía hacia el santuario Virgen de Chapí Charcani - Cayma* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional UNSA. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12906>

- Cobos, C. (2023). *Infraestructura de ciclovías y desarrollo sostenible en la urbanización Retablo - Distrito de Comas - 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio Institucional UNH. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/5452>
- Cuicapuza, N. J. (2023). *Propuesta de diseño de concreto permeable con agregados reciclados y adición de PET para su aplicación en un innovador sistema de drenaje de las ciclovías que presentan inundaciones en temporadas altas de lluvias en el Distrito de Piura - Provincia de Piura* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/676266>
- Environmental Protection Agency. (2023). *Cool pavements and urban heat island reduction*. <https://www.epa.gov/heat-islands/cool-pavements>
- Defensoría del Pueblo. (2022). *Informe de supervisión: Seguridad vial en espacios públicos urbanos de Arequipa*. Defensoría del Pueblo. <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2022/12/Informe-Seguridad-Vial-Arequipa-2022.pdf>
- Deo, O., & Neithalath, N. (2019). Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. *Materials Science and Engineering: A*, 528(1), 402-412. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.024>
- EPA (Environmental Protection Agency). (2023). *Cool pavements and urban heat island reduction*. EPA Office of Research and Development. <https://www.epa.gov/heat-islands/cool-pavements>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>

- Guerra Chayña, P. R., & Guerra Ramos, C. E. (2020). Diseño de un pavimento rígido permeable como sistema urbano de drenaje sostenible. *Fides et Ratio - Revista de Difusión Cultural y Científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 20 (20), 121-140. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-081X2020000200008](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2020000200008)
- Haselbach, L. M., & Valavala, S. (2006). *Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems* 36(11), 2013-2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.019>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill.
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2022). *Monitoreo de glaciares y ecosistemas de montaña 2022: Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región andina* (Informe Anual N° 2022-01). <https://www.inaigem.gob.pe/publicaciones/informe-anual-2022-monitoreo-glaciares-ecosistemas>
- Litman, T. (2022). *Evaluating active transport benefits and costs*. Victoria Transport Policy Institute. <https://www.vtpi.org/nmt-tdm.pdf>
- Lu, G., Liu, P., Wang, Y., Faßbender, S., Wang, D., & Oeser, M. (2019). Development of a sustainable pervious pavement material using recycled ceramic aggregate and bio-based polyurethane binder. *Journal of Cleaner Production*, 225, 376-387. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.184>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2021). *Guía de diseño de ciclovías*. MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2023). *Más ciclovías para la salud y contra la contaminación ambiental en Arequipa*. Programa Nacional de Transporte Urbano Sostenible. <https://www.gob.pe/institucion/promovilidad/noticias/811129-mas-ciclovias-para-la-salud-y-contra-la-contaminacion-ambiental-en-arequipa>

- Ministerio del Ambiente. (2018). Ley N° 30754: Ley Marco sobre Cambio Climático. Diario Oficial El Peruano. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/04/Ley-MARCO-SOBRE-CAMBIO-CLIMATICO.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2021a). *Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma A.120 Accesibilidad Universal en Edificaciones*. MVCS.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2021b). *Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma U.010 Movilidad Urbana*. MVCS.
- Instituto Nacional de Calidad (2018)NTP 339.185: *Concreto. Determinación de la permeabilidad del concreto*. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad (2020)NTP 339.034: *Concreto. Ensayo de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto*. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad (2020)NTP 339.078: *Concreto. Ensayo de resistencia a la flexión de probetas de concreto*. INACAL.
- Peralta Rodríguez, E. F., & Huamolles Rengifo, E. A. (2023). *Influencia del agregado fino y piedra chancada huso 67 en las propiedades del concreto permeable para vías urbanas, Tacna, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio de la Universidad Privada de Tacna. <https://hdl.handle.net/20.500.12969/2779>
- Príncipe, G. I. (2022). *Herramientas del manual de seguridad vial para realizar las inspecciones en el sistema nacional de carreteras del Perú - SINAC* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/6476>
- Ramos, R. R. (2021). *Evaluación estructural y superficial del pavimento de la Av. Lambramani con fines de diagnóstico y rehabilitación* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/12707>
- Rengifo, R., & Valles, R. (2019). *Diseño del concreto permeable para mejorar la evacuación de aguas pluviales en las ciclovías en Jr. Ramón Castilla C-8 a C-13, y Jr. los Girasoles C-1 a C-3 – Tarapoto, 2019* [Tesis de pregrado,

- Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/46385>
- República del Perú. (2019). *Ley N.º 30996: Ley que promueve y regula el uso de la bicicleta como medio de transporte sostenible*. Congreso de la República.
- Rojas, C., & Chicmana, V. (2017). ¿Cómo se hace un ciclista urbano? El caso de Cicloaxion. *Revista La Colmena*, (10), 36-45. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/lacolmena/article/view/20692>
- Rosales, R. (2019). *Estudio de la situación actual y propuesta de tránsito y transporte en la provincia de Pomabamba, departamento de Ancash* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/3060>
- Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>
- Kia, A. (2023). Permeable concrete pavements for a climate change resilient built environment. *Journal of Environmental Management*, 325, Article 116128. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95336-8.00006-8>
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious concrete pavements* (EB302, PCA Serial No. 2828). Portland Cement Association. <https://trid.trb.org/View/813983>
- Torres, B. (2022). *Diseño geométrico de carreteras empleando software Civil-3D para optimización de transitabilidad vehicular de la ruta PU-804 del distrito de Samán, provincia de Azángaro* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/6029>
- Guizado Barrios, A.X., Curi Grados, E.R.P.(2017) *Evaluación del concreto permeable como una alternativa para el control de las aguas pluviales en vías locales y pavimentos especiales de la costa noroeste del Perú* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/9831>

APÉNDICES  
**Apéndice 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA**

**Evaluación de pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025**

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>INTERROGANTE PRINCIPAL</b>            ¿Cómo evaluar los pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025?</p> <p><b>INTERROGANTES ESPECÍFICAS</b>            ¿Calcular los parámetros de diseño de pavimentos rígidos con concreto permeable para para pasajes peatonales y ciclovías en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025?</p> <p>¿Cómo afectan la funcionalidad, seguridad y accesibilidad vial en el diseño de pasajes peatonales y ciclovías en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025?</p> <p>¿Cómo puede mejorar los indicadores de sostenibilidad urbana con la implementación de pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025?</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b>            Evaluar los pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025</p> <p><b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>            determinar el cálculo de los parámetros de diseño de pavimentos rígidos con concreto permeable para para pasajes peatonales y ciclovías en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025.</p> <p>Determinar los efectos de la funcionalidad, seguridad y accesibilidad universal para el diseño de pasajes peatonales y ciclovías en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre Arequipa, 2025</p> <p>Mejorar los indicadores de sostenibilidad urbana con la implementación de pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido con concreto permeable en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre, durante el año 2025</p>	<p><b>Variable (X)</b>            Pasajes peatonales y ciclovías  <b>Dimensión1:</b> Funcionalidad y seguridad vial  <b>Indicadores:</b>            1. Nivel de servicio            2. Señalización vial  <b>Dimensión2:</b> Accesibilidad vial  <b>Indicadores:</b>            1. Geometría vial            2. Conectividad vial</p> <p><b>Variable (Y)</b>            Pavimento rígido con concreto permeable  <b>Dimensión1:</b> propiedades mecánicas  <b>Indicador:</b>            1. Resistencia a la compresión            2. Resistencia a la flexión  <b>Dimensión2:</b> Propiedades hidrológicas  <b>Indicadores:</b>            1. Capacidad de infiltración            2. Coeficiente de permeabilidad  <b>Dimensión3:</b> Sostenibilidad urbana            1. Drenaje pluvial-Reducción de escorrentía superficial            2. Sostenibilidad ambiental-reducción de temperatura superficial</p>	<p><b>-Tipo de investigación</b>            Aplicada  <b>-Enfoque de investigación</b>            Cuantitativa  <b>-Nivel de investigación</b>            Aplicativo  <b>-Diseño de la investigación</b>            No experimental  <b>-Ámbito de estudio</b>            Sector Alto Selva Alegre, Boulevard Los Andes - Arequipa  <b>- Población</b>            Longitud total 05 cuadras del Boulevard Los Andes con una longitud de 372ml.  <b>-Muestra</b>            Longitud de 02 cuadras de Boulevard Los Andes, con L=140ml (tramos entre Av. Argentina con Los Andes (C4) y Av. España con Los Andes (C5), estas cuadras seleccionadas por muestreo no probabilístico por conveniencia.  <b>-Técnicas de recolección de datos</b>            Análisis documental (exp tec de obra)            Observación  <b>-Instrumentos</b>            Formatos de Calculo</p>
<p>El estudio se enfoca en evaluar pasajes peatonales y ciclovías con pavimento rígido de concreto permeable del Boulevard Los Andes (372 ml, muestra 140 ml). Mediante la observación y medición directa, evaluando la funcionalidad, seguridad, accesibilidad y la sostenibilidad urbana para proponer mejoras que alineen el boulevard con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11 y 13), optimizando la movilidad y el drenaje urbano en Arequipa 2025.</p>			

## Apéndice 2 Certificados de ensayo de laboratorio

### B-1: Certificado de ensayo N° 001-2026-LEC (Compresión)



Estudio de Mecánica de Suelos y Rocas  
 Concreto y Asfalto  
 Asesoría Técnica  
 Supervisión de Obras Civiles

#### ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO

**TESIS** : "Evaluación de pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido de concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025"  
**SOLICITA** : Bach. Raul Vilca Mamani  
**FECHA** : 07/03/2026  
**UBICACION** : BOULEVARD LOS ANDES  
**NORMA DE REFERENCIA**: NTP 339.034 / ASTM C39  
**EQUIPO UTILIZADO**: Máquina de compresión universal ELE International, modelo ADR 2000, serie 4587-03, con capacidad de 2000 kN, calibrada el 15/01/2026 (Certificado de Calibración N° CCP-012-2026).

Código	Fecha de Vaceado	Fecha de Ensayo	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga Máx. (kN)	Fc (MPa)	Promedio (MPa)
MP-01-C-01	05/02/2026	12/02/2026	7	150.1	17,690	216.8	12.26	
MP-01-C-02	05/02/2026	12/02/2026	7	149.9	17,643	220.7	12.51	12.39
MP-01-C-03	05/02/2026	19/02/2026	14	150.2	17,709	348.5	19.68	
MP-01-C-04	05/02/2026	19/02/2026	14	150.0	17,671	356.2	20.16	19.92
MP-01-C-05	05/02/2026	05/03/2026	28	149.8	17,615	465.3	26.42	
MP-01-C-06	05/02/2026	05/03/2026	28	150.3	17,729	459.8	25.93	26.18
MD-01-C-01	06/02/2026	13/02/2026	7	150.2	17,709	247.5	13.97	
MD-01-C-02	06/02/2026	13/02/2026	7	149.9	17,643	253.8	14.38	14.18
MD-01-C-03	06/02/2026	20/02/2026	14	150.0	17,671	390.8	22.12	
MD-01-C-04	06/02/2026	20/02/2026	14	150.1	17,690	401.2	22.68	22.40
MD-01-C-05	06/02/2026	06/03/2026	28	149.8	17,615	515.6	29.27	
MD-01-C-06	06/02/2026	06/03/2026	28	150.2	17,709	522.8	29.52	29.40
MD-02-	07/02/2026	14/02/2026	7	150.1	17,690	195.0	11.02	

Av. Mariscal Castilla 1227 Urb. Santa Rosa - Mariano Melgar - Arequipa (054)592790 - Mov. 972678395  
 RUC: 20604438331 Email : conslabertt@gmail.com



**CONSLABERTT EIRL**

Estudio de Mecánica de Suelos y Rocas  
 Concreto y Asfalto  
 Asesoría Técnica  
 Supervisión de Obras Civiles

Código	Fecha de Vaceado	Fecha de Ensayo	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga Máx. (kN)	Fc (MPa)	Promedio (MPa)
C-01								
MD-02-C-02	07/02/2026	14/02/2026	7	150.0	17,871	281.1	15.90	<b>15.70</b>
MD-02-C-03	07/02/2026	21/02/2026	14	149.9	17,843	429.1	24.32	
MD-02-C-04	07/02/2026	21/02/2026	14	150.2	17,709	437.2	24.68	<b>24.50</b>
MD-02-C-05	07/02/2026	07/03/2026	28	150.3	17,729	562.8	31.74	
MD-02-C-06	07/02/2026	07/03/2026	28	150.0	17,871	568.9	32.19	<b>31.97</b>

**OBSERVACIONES:**

1. Las probetas fueron elaboradas, curadas y ensayadas siguiendo los procedimientos establecidos en las normas NTP 339.033 y NTP 339.034.
2. El curado se realizó por inmersión en agua a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  hasta la edad de ensayo.
3. Las probetas presentaron superficies de falla típicas (cono y división) acordes con concretos de resistencia media.
4. Los resultados corresponden exclusivamente a las muestras ensayadas.

CONSLABERTT EIRL  
  
 Ing. Erika R. Trujillo Yltona  
 C.I.P. 222310



Av. Mariscal Castilla 1227 Urb. Santa Rosa – Mariano Melgar - Arequipa (054)592790 - Mov. 972678395  
 RUC: 20604438331 Email : conslabertt@gmail.com

## B-2: Certificado de ensayo N° 002-2026-LEF (Flexión)



CONSLABERTT EIRL

Estudio de Mecánica de Suelos y Rocas  
 Concreto y Asfalto  
 Asesoría Técnica  
 Supervisión de Obras Civiles

## ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN VIGAS DE CONCRETO

**TESIS** : "Evaluación de pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido de concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025"

**SOLICITA** : Bach. Raul Vilca Mamani

**FECHA** : 07/03/2026

**UBICACION** : BOULEVARD LOS ANDES

**NORMA DE REFERENCIA**: NTP 339.034 / ASTM C39

**EQUIPO UTILIZADO**: Máquina de compresión universal ELE International, modelo ADR 2000, serie 4587-03, con capacidad de 2000 Kn.

**NORMA DE REFERENCIA**: NTP 339.078 / ASTM C78 (Método de carga en los tercios)

**EQUIPO UTILIZADO**: Máquina universal de ensayos Controls, modelo 50-C46H2, serie 7845-06, con capacidad de 300 kN.

**CONDICIONES AMBIENTALES**: Temperatura: 21.8°C ± 1.2°C | Humedad relativa: 64% ± 4%

**DIMENSIONES DE LAS VIGAS**: 150 mm × 150 mm × 500 mm (según NTP 339.078)

**LUZ LIBRE ENTRE APOYOS (L)**: 450 mm

Código	Fecha de Vaceado	Fecha de Ensayo	Edad (días)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Carga Máx. (kN)	MR (MPa)	Promedio (MPa)
MP-01-F-01	05/02/2026	05/03/2026	28	150.3	150.2	18.6	3.69	
MP-01-F-02	05/02/2026	05/03/2026	28	150.1	150.3	19.3	3.83	
MP-01-F-03	05/02/2026	05/03/2026	28	150.2	150.1	18.9	3.75	
MP-01-F-04	05/02/2026	05/03/2026	28	150.0	150.3	19.6	3.89	3.79
MD-01-F-01	06/02/2026	06/03/2026	28	150.1	150.2	21.7	4.31	
MD-01-F-02	06/02/2026	06/03/2026	28	150.3	150.1	22.4	4.45	
MD-01-F-03	06/02/2026	06/03/2026	28	150.2	150.3	22.0	4.37	
MD-01-F-04	06/02/2026	06/03/2026	28	150.0	150.2	21.7	4.31	

CONSLABERTT EIRL  
 Ing. Erick R. Prado Falconi  
 C.I.P. 222310



Av. Mariscal Castilla 1227 Urb. Santa Rosa – Mariano Melgar - Arequipa ☎ (054)592790 - 📱 Mov. 972678395  
 RUC: 20604438331 Email : conslabertt@gmail.com



CONSLABERTT EIRL

Estudio de Mecánica de Suelos y Rocas  
 Concreto y Asfalto  
 Asesoría Técnica  
 Supervisión de Obras Civiles

Código	Fecha de Vaceado	Fecha de Ensayo	Edad (días)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Carga Máx. (kN)	MR (MPa)	Promedio (MPa)
MD-02-F-01	07/02/2026	07/03/2026	28	150.2	150.1	24.9	4.96	
MD-02-F-02	07/02/2026	07/03/2026	28	150.1	150.2	25.4	5.05	
MD-02-F-03	07/02/2026	07/03/2026	28	150.3	150.0	24.6	4.89	
MD-02-F-04	07/02/2026	07/03/2026	28	150.0	150.2	25.9	5.14	5.01

**CÁLCULO DEL MÓDULO DE ROTURA (MR):**

$MR = P \cdot Lb \cdot h^2$

Donde:

P = Carga máxima (N)

L = Luz libre entre apoyos (450 mm)

b = Ancho promedio de la viga (mm)

h = Altura promedio de la viga (mm)

**OBSERVACIONES:**

1. Las vigas fueron elaboradas, curadas y ensayadas siguiendo los procedimientos establecidos en las normas NTP 339.078.
2. El curado se realizó por inmersión en agua a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  hasta la edad de ensayo.
3. Todas las vigas presentaron superficies de falla dentro del tercio central, válidas según norma.
4. Los resultados corresponden exclusivamente a las muestras ensayadas.

CONSLABERTT EIRL  
 Ing. Erika R. Trejillo Yicono  
 C.I.P. 222310



## B-3: Certificado de ensayo N° 003-2026-LEP (Permeabilidad)



CONSLABERTT EIRL

Estudio de Mecánica de Suelos y Rocas  
 Concreto y Asfalto  
 Asesoría Técnica  
 Supervisión de Obras Cíviles

## ENSAYOS DE PERMEABILIDAD SOBRE LOSAS DE CONCRETO PERMEABLE

**TESIS** : "Evaluación de pasajes peatonales y ciclovías de pavimento rígido de concreto permeable con enfoque ciudad sostenible en el Boulevard Los Andes, Alto Selva Alegre-Arequipa 2025"  
**SOLICITA** : Bach. Raul Vilca Mamani  
**FECHA** : 07/03/2026  
**UBICACION** : BOULEVARD LOS ANDES

**NORMA DE REFERENCIA:** ASTM C1701 (adaptada para condiciones de laboratorio)

**EQUIPO UTILIZADO:** Permeámetro de anillo simple (diámetro interior 300 mm), cilindro graduado de 5000 ml, cronómetro digital (precisión 0.01 s).

**DIMENSIONES DE LAS LOSAS:** 400 mm x 400 mm x 150 mm (elaboradas según procedimiento interno)

**CONDICIONES DE ENSAYO:** Losas secas superficialmente, temperatura ambiente 22°C ± 1°C.

**PROCEDIMIENTO:**

1. Se colocó el anillo infiltrómetro sobre la superficie de la losa, sellando los bordes con masilla plástica para evitar fugas laterales.
2. Se prehumedeó la superficie con 500 ml de agua y se esperó 5 minutos.
3. Se vertieron 5000 ml de agua sobre la superficie, midiendo el tiempo transcurrido desde que el agua toca la superficie
4. hasta que desaparece completamente.
5. Se realizaron 3 mediciones por cada losa en diferentes puntos de la misma.

Mezcla	Losa N°	Punto de Ensayo	Medición	Tiempo (s)	I (mm/h)	Promedio Punto (mm/h)	Promedio Losa (mm/h)	Promedio Mezcla (mm/h)
MP-01	L-01	P1	1	186.8	306.5			
			2	184.5	310.3	308.4		
		P2	1	184.0	311.0			
			2	183.2	312.3	311.7		
		P3	1	188.5	303.5			
			2	187.2	305.5	304.5	308.2	
	L-02	P1	1	181.8	314.7			
			2	180.5	317.0	315.9		
		P2	1	180.0	317.9			
			2	178.8	319.9	318.9		
P3	1	184.8	309.6					
	2	183.5	311.7	310.7	315.2	311.7		
MD-01	L-03	P1	1	202.6	282.4			

CONSLABERTT EIRL  
 Ing. Erika R. Trejillo Nicoma  
 C.I.P. 2227310



Av. Mariscal Castilla 1227 Urb. Santa Rosa – Mariano Melgar - Arequipa (054)592790 - Mov. 972678395  
 RUC: 20604438331 Email : conslabertt@gmail.com



**CONSLABERTT EIRL**

Estudio de Mecánica de Suelos y Rocas  
 Concreto y Asfalto  
 Asesoría Técnica  
 Supervisión de Obras Civiles

Mezcla	Losa N°	Punto de Ensayo	Medición	Tiempo (s)	l (mm/h)	Promedio Punto (mm/h)	Promedio Losa (mm/h)	Promedio Mezcla (mm/h)
		P1	2	200.4	285.6	284.0		
		P2	1	199.8	286.4			
		P2	2	198.2	288.7	287.6		
		P3	1	204.5	279.8			
		P3	2	203.2	281.5	280.7	<b>284.1</b>	
	L-04	P1	1	200.8	284.9			
		P1	2	199.0	287.6	286.3		
		P2	1	197.5	289.8			
		P2	2	196.2	291.7	290.8		
		P3	1	200.2	285.8			
		P3	2	198.6	288.1	287.0	<b>288.0</b>	<b>286.1</b>
<b>MD-02</b>	L-05	P1	1	226.2	252.9			
		P1	2	224.3	255.1	254.0		
		P2	1	224.6	254.7			
		P2	2	222.9	256.7	255.7		
		P3	1	227.5	251.5			
		P3	2	225.7	253.5	252.5	<b>254.1</b>	
	L-06	P1	1	223.9	255.5			
		P1	2	222.2	257.5	256.5		
		P2	1	222.5	257.1			
		P2	2	220.9	259.0	258.1		
		P3	1	225.2	254.1			
		P3	2	223.5	256.0	256.6		

CONSLABERTT EIRL  
 Ing. Erika R. Trujillo Ticona  
 C.I.P. 222316





**CONSLABERTT EIRL**

Estudio de Mecánica de Suelos y Rocas  
 Concreto y Asfalto  
 Asesoría Técnica  
 Supervisión de Obras Civiles

**RESUMEN DE RESULTADOS:**

Mezcla	Tiempo promedio (s)	Permeabilidad promedio (mm/h)	Cumple ( $\geq 300$ mm/h)
MP-01	183.7	<b>311.7</b>	<b>SI</b>
MD-01	199.9	286.1	NO
MD-02	223.5	255.4	NO

**OBSERVACIONES:**

1. Los ensayos se realizaron a los 28 días de edad de las losas.
2. Se verificó que no existieran fugas laterales durante los ensayos.
3. La mezcla MP-01 presenta la mayor permeabilidad, cumpliendo con el objetivo de  $\geq 300$  mm/h.
4. Las mezclas con aditivo plastificante (MD-01 y MD-02) presentan menores permeabilidades, confirmando la relación inversa entre resistencia y permeabilidad.
5. Los resultados corresponden exclusivamente a las muestras ensayadas.



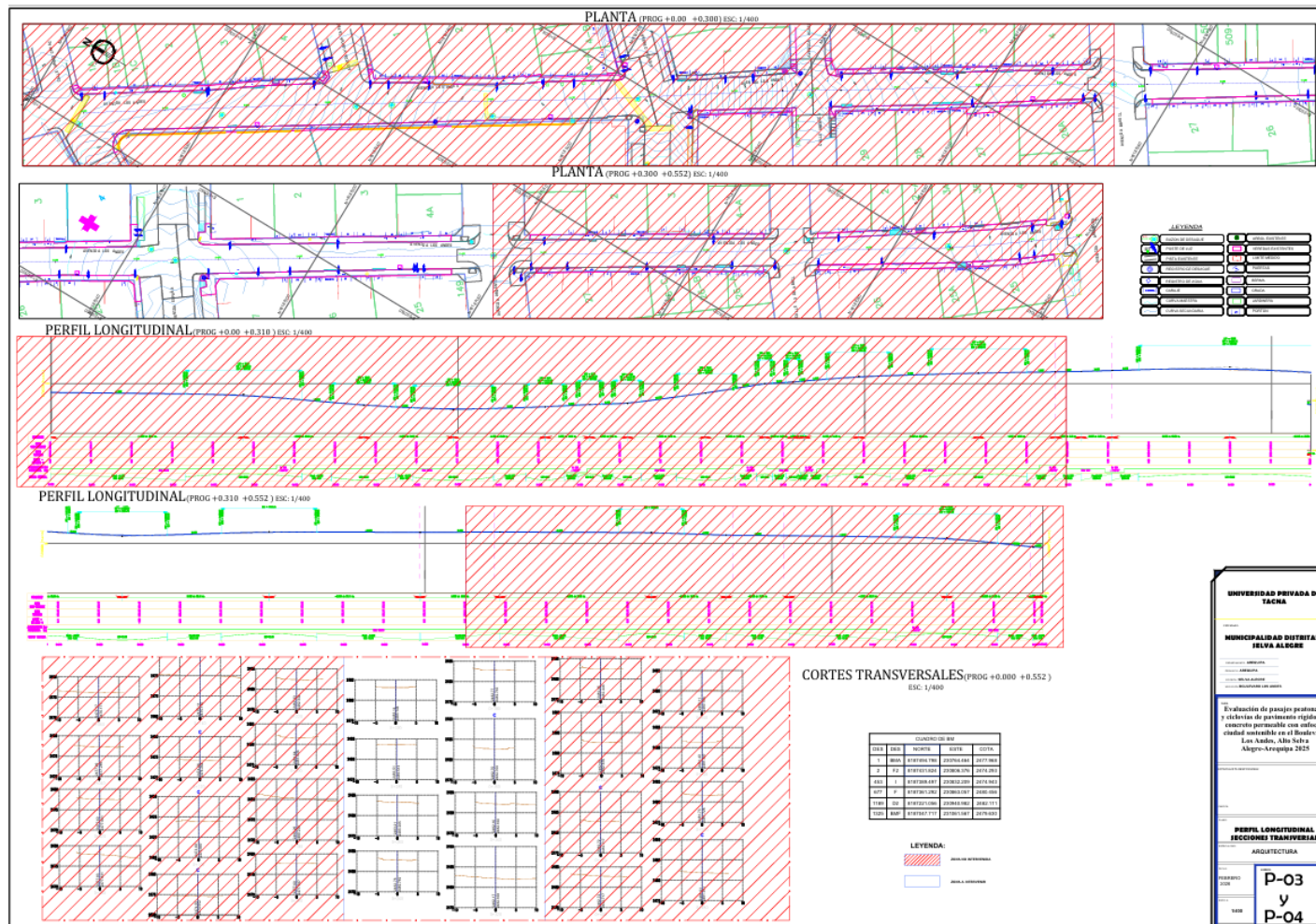
CONSLABERTT EIRL  
 Ing. Erika R. Trujillo Ticona  
 C.I.P. 222310



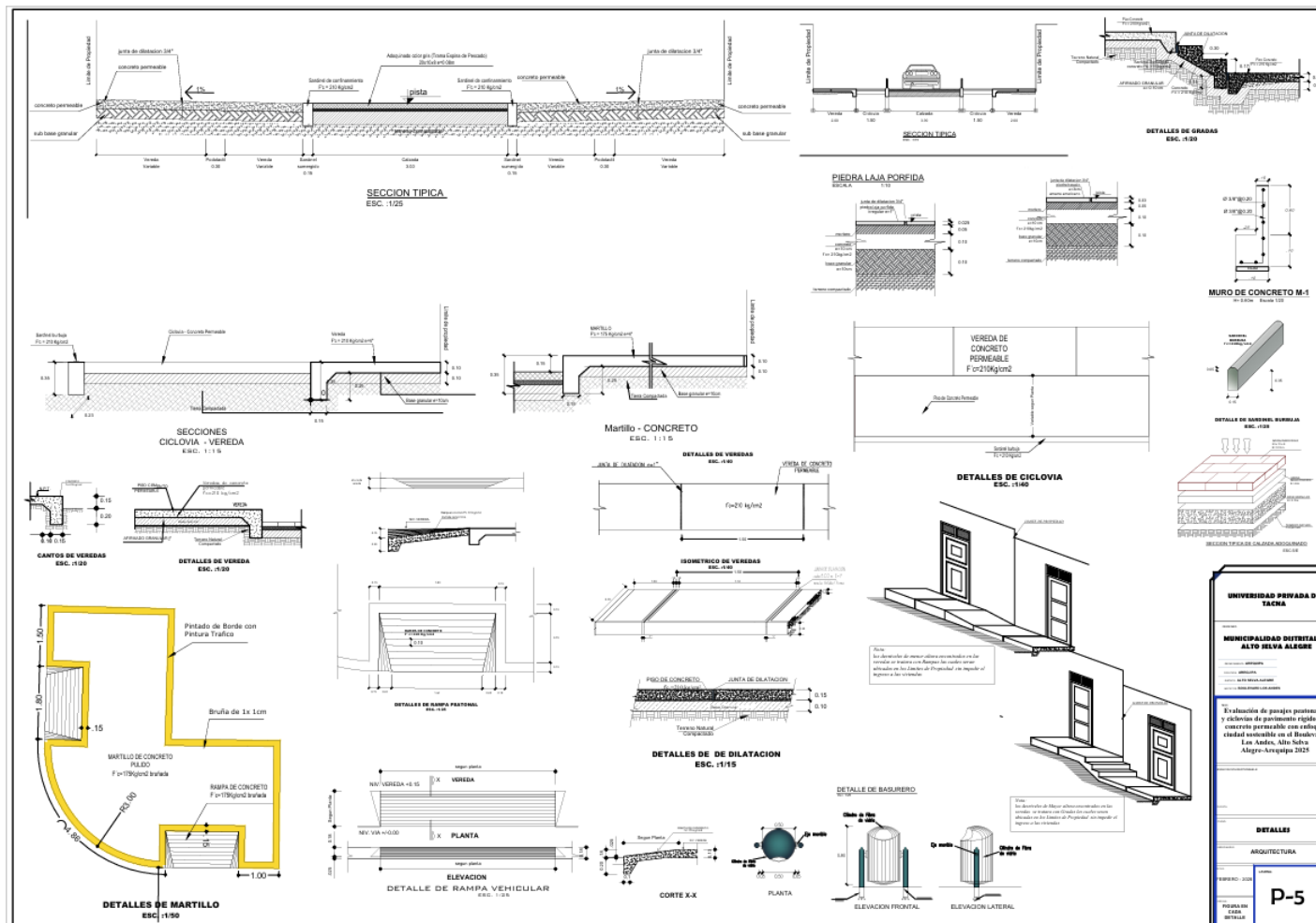
Av. Mariscal Castilla 1227 Urb. Santa Rosa – Mariano Melgar - Arequipa (054)592790 - Mov. 972678395  
 RUC: 20604438331 Email : conslabertt@gmail.com



P-03, P-04: Perfil Longitudinal Secciones Transversales - H=1:1000, V=1:100



### P-05: Detalles Constructivos - Rampas - Esc. 1:50



**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**

**MUNICIPALIDAD DISTRICTAL DE ALTO SELVA ALEGRE**

Elaboración de pautas constructivas y detalles de pavimento rígido con concreto permeable para el proyecto ciudad sostenible en el Boulevard San Andrés, Alto Selva Alegre-Arequipa 2023

**DETALLES**

ARQUITECTURA

PROYECTO: 2024

**P-5**

PROFESORA: CARMEN BUSTAMANTE

