

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA



**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA
PERMEABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN LA EXCAVACIÓN DEL
TÚNEL PUNTA OLÍMPICA, ÁNCASH, 2025**

TESIS

Presentada por:

Bach. Jimmy Silvestre Corpus Acosta

ORCID: 0000-0002-7918-4409

Asesor:

Mtro. Alfonso Oswaldo Flores Mello

ORCID: 0000-0003-4539-7921

Para obtener el grado académico de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN ENGEOTECNIA

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA

Tesis

“CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA
PERMEABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN LA EXCAVACIÓN DEL
TÚNEL PUNTA OLÍMPICA, ÁNCASH, 2025”

Presentada por:

Bach. Jimmy Silvestre Corpus Acosta

Tesis sustentada y aprobada el 11 de agosto de 2026; ante el siguiente jurado
examinador:

PRESIDENTE: Dr. Anibal Juan ESPINOZA ARANCIAGA.

SECRETARIO: Dr. Roger Alberto PRÍNCIPE REYES.

VOCAL: Dr. Oscar Walther NOVOA CASTILLO.

ASESOR: Mtro. Alfonso Oswaldo FLORES MELLO.

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo Jimmy Silvestre Corpus Acosta, en calidad egresado de la MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado (a) con DNI: 40516062.

Soy autor (a) de la tesis titulada:

“CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA PERMEABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL PUNTA OLÍMPICA, ÁNCASH, 2025”, con asesor: Mtro. Alfonso Oswaldo FLORES MELLO

DECLARO BAJO JURAMENTO

Ser el único autor del texto entregado para obtener el grado académico de MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA, 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.

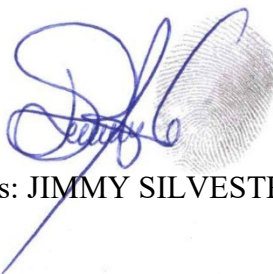
Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información

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: 11 de agosto del 2026

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jimmy Silvestre', is placed over a circular fingerprint. The signature is fluid and cursive. The fingerprint is a standard ten-print pattern, also in blue ink.

Nombres y apellidos: JIMMY SILVESTRE CORPUS ACOSTA
DNI: 40516062

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la sabiduría, la fuerza y la fe necesarias para no rendirme. Su presencia ha sido mi refugio en los momentos de dificultad y mi impulso en cada logro.

Dedico esta tesis a la memoria de mis padres Energina Acosta Maza y Silvestre Corpus Campomanes, quienes desde el cielo guían cada uno de mis pasos. Gracias por ser mis primeros maestros y por inculcarme el valor del estudio y la perseverancia. Su ejemplo sigue siendo la luz que ilumina mi camino profesional y personal, Esta tesis es el reflejo del ejemplo, la fe y los valores que me han inculcado. Todo lo que soy y todo lo que he logrado, se los debo a ustedes con todo mi amor y gratitud.

A mi mayor fuente de amor, paciencia y sentido:

A ti, mi compañera de vida, mi esposa Vilma, gracias por tu apoyo incondicional, por sostenerme en los días de cansancio y celebrar conmigo en cada logro. Tu fe en mí fue el impulso que necesitaba para no rendirme.

Y a mis hijos Itzel y Zahir, cuya sola presencia me inspiran a ser mejor cada día: esta meta también es para ellos, porque me enseñan con su alegría y su ternura que todo esfuerzo vale la pena.

Gracias por ser mi hogar, mi fuerza y mi mayor motivación.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios, por haber guiado cada paso de mi vida con sabiduría, fortaleza y amor. En los momentos de duda, fue Su presencia la que me sostuvo y me dio la serenidad para seguir adelante. Sin Él, este logro no habría sido posible.

A mi familia, especialmente a mis padres Energina Acosta Maza y Silvestre Corpus Campomanes, que desde el cielo guían mi camino y por ser mi mayor fuente de inspiración. A mi familia esposa Vilma y mis hijos Itzel y Zahirk, Gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios constantes y por acompañarme con paciencia y fe durante todo este proceso.

Cada avance en este trabajo lleva consigo el esfuerzo y el cariño que me han brindado desde siempre.

A mi Asesor de tesis Mtro. Alfonso Oswaldo FLORES MELLO, mi más sincero agradecimiento por su compromiso, por su guía constante y por compartir sus conocimientos con claridad, exigencia y respeto. Su asesoría fue clave para el desarrollo académico y estructural de esta investigación.

A la Universidad Privada de Tacna, por abrirme las puertas a una formación integral y por brindarme un entorno académico que me permitió crecer tanto personal como profesionalmente. Agradezco a sus docentes y a cada espacio de aprendizaje que fue parte de este camino.

A todos los que, de una u otra manera, fueron parte de este camino, gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA.....	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.2.1 Problema principal.....	22
1.2.2 Problemas secundarios.....	22
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	23
1.4 OBJETIVOS	23
1.4.1 Objetivo general.....	23
1.4.2 Objetivos específicos	24
CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL	25
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	25
2.2 NORMATIVA VIGENTE	31
2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS	32
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO.....	34
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA	34
3.1.1 Tipo de investigación.....	34
3.1.2 Nivel de investigación	34

3.1.3 Justificación del enfoque aplicado	34
3.2 DISEÑO DEL PROYECTO	35
3.2.1 Etapas del proyecto	35
3.2.2 Herramientas y/o software utilizado	39
3.3 EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD	40
3.3.1 Evaluación técnica	40
3.3.2 Factibilidad	42
3.4 PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN	44
3.4.1 Cronograma de actividades.....	44
3.4.2 Asignación de recursos	47
3.4.3 Costos y financiamiento	49
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1 CARACTERIZACIÓN Y EL ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA PERMEABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL PUNTA OLÍMPICA, ÁNCASH, 2025.....	50
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO EN TÉRMINOS DE FRACTURAMIENTO, CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y GRADO DE SATURACIÓN	55
4.3 VARIACIONES EMPÍRICAS DE PERMEABILIDAD A LO LARGO DE LOS DISTINTOS TRAMOS DE EXCAVACIÓN	69
4.4 VARIACIONES GEOMECÁNICAS ASOCIADAS A LOS CAMBIOS DE PERMEABILIDAD EN LOS DIFERENTES TRAMOS DEL TÚNEL....	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
REFERENCIAS.....	89
APÉNDICE	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Longitud de red vial nacional, departamental y vecinal por departamento	18
Tabla 2 Disponibilidad de ensayos geotécnicos y de permeabilidad en el Túnel Punta Olímpica.....	21
Tabla 3 Normas internacionales aplicadas en la evaluación técnica del macizo rocoso	41
Tabla 4 Evaluación de la factibilidad técnica, económica y ambiental del proyecto	42
Tabla 5 Plan de ejecución.....	44
Tabla 6 Cronograma.....	46
Tabla 7 Recursos	47
Tabla 8 Costo estimado	49
Tabla 9 Unidades geológicas identificadas	59
Tabla 10 Densidad de fracturas	60
Tabla 11 Ensayo Lugeon.....	64
Tabla 12 Presión de poros	67
Tabla 13 Relación de permeabilidad-estabilidad	69
Tabla 14 Relación entre permeabilidad, estabilidad y sostenimiento	72
Tabla 15 Variaciones geomecánicas asociadas a los cambios de permeabilidad en los tramos del túnel	76
Tabla 16 Correlación entre permeabilidad, deterioro local y tipo de sostenimiento aplicado	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Distribución estimada de causas de demora en túneles de montaña	17
Figura 2 Trazo del Túnel Punta Olímpica y sectores sin registro de permeabilidad	21
Figura 3 Flujograma de la Etapa 1: Revisión documental y planificación técnica	35
Figura 4 Flujograma de la Etapa 2: Trabajo de campo y toma de datos geotécnicos	36
Figura 5 Flujograma de la Etapa 3: Procesamiento y análisis de datos	37
Figura 6 Flujograma de la Etapa 4: Interpretación de resultados y elaboración del informe técnico.....	38
Figura 7 Esquema de instrumentación y ensayos de permeabilidad en el Túnel Punta Olímpica.....	40
Figura 8 Interacción de los factores de factibilidad técnica, económica y ambiental del proyecto	43
Figura 9 Ubicación geográfica del Túnel Punta Olímpica dentro del corredor vial Carhuaz–Chacas–San Luis.....	50
Figura 10 Geología del túnel.....	51
Figura 11 Caracterización, permeabilidad, estabilidad y sostenimiento del macizo	52
Figura 12 Perfil longitudinal del túnel	56
Figura 13 Plano en planta geológico.....	57
Figura 14 Perfil longitudinal geológico	58
Figura 15 Plano geotécnico.....	62
Figura 16 Corte transversal típico del Túnel Punta Olímpica.....	63
Figura 17 Vista general del portal de salida del proyecto y presencia de glaciarr colgante.	66

Figura 18 Sección geofísica - Línea sísmica LS-1.....	71
Figura 19 Sección geofísica - Línea sísmica LS-2.....	72
Figura 20 Sección geofísica - Línea sísmica LS-3.....	74
Figura 21 Secuencia de fases de excavación del túnel – Método convencional..	78
Figura 22 Detalle C del sistema de sostenimiento con perno, resina y shotcrete	79
Figura 23 Distribución interna de esfuerzos y respuesta del sostenimiento en la sección del túnel.....	80
Figura 24 Distribución del macizo rocoso alrededor de la sección excavada	81

ÍNDICE DE APÉNDICES

Matriz de consistencia del informe final de tesis	94
---	----

RESUMEN

La investigación caracteriza la permeabilidad del macizo rocoso en la excavación del Túnel Punta Olímpica mediante mapeo geológico, clasificación geomecánica, ensayos Lugeon y perfiles sísmicos, con el fin de identificar cómo la litología, el fracturamiento y la saturación influyen en la estabilidad y el sostenimiento a lo largo de diez tramos. Los resultados muestran que las andesitas y granodioritas compactas de los tramos T1, T3, T6 y T10 presentan entre dos y seis fracturas por metro, permeabilidad muy baja a baja, humedad reducida y presiones de poros estables, lo que genera alta estabilidad y permite sostenimientos simples como shotcrete delgado y pernos ocasionales. En contraste, los tramos T4, T7 y T9, formados por filitas, argilitas y rellenos blandos, registran más de ocho fracturas por metro, permeabilidad media o moderada–alta y mayores niveles de humedad, condiciones que disminuyen la cohesión, elevan la presión de poros y requieren drenes, mallas y shotcrete reforzado. La distribución longitudinal evidencia que la permeabilidad se concentra en una franja central asociada a variaciones litológicas, relieve y carga hidráulica externa, coherente con los contrastes de velocidad sísmica observados en las líneas LS-1, LS-2 y LS-3. La correlación entre permeabilidad y deterioro local confirma que el incremento del flujo debilita el macizo y obliga a endurecer el soporte, consolidando la permeabilidad como un parámetro determinante para la respuesta hidrogeotécnica y para la selección adecuada del sostenimiento en túneles de alta montaña como Punta Olímpica.

PALABRAS CLAVES

Permeabilidad, macizos rocosos, túneles, geotecnia, ingeniería, construcción subterránea.

ABSTRACT

The study characterizes the permeability of the rock mass along the excavation of the Punta Olímpica Tunnel through geological and structural mapping, geomechanical classification, Lugeon hydraulic testing and seismic profiling, in order to determine how lithology, fracturing and saturation influence stability and the support required across ten representative sections. Results show that compact andesite and granodiorite in sections T1, T3, T6 and T10 display two to six fractures per meter, very low to low permeability, reduced moisture and stable pore pressure, conditions that provide high stability and allow for basic support systems such as thin-shotcrete linings and occasional rock bolts. Conversely, sections T4, T7 and T9 composed of phyllite, argillite and soft infill materials present more than eight fractures per meter, medium to moderately high permeability and higher moisture levels, which decrease mechanical strength, increase pore pressure and require reinforced support including drainage systems, wire mesh and thick shotcrete. Longitudinal analysis reveals that permeability concentrates in a central band associated with lithological transitions, topographic gradients and external hydraulic loading, consistent with seismic velocity contrasts observed in profiles LS-1, LS-2 and LS-3. The correlation between permeability and local deterioration confirms that increasing water inflow weakens the rock mass and demands stiffer support systems, consolidating permeability as a key parameter to interpret hydrogeotechnical behavior and to optimize drainage and support design in high-mountain tunnels such as Punta Olímpica.

KEYWORDS

Permeability, rock masses, tunnels, geotechnics, engineering, underground construction.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo vial en los Andes peruanos ha impulsado la necesidad de abrir túneles cada vez más largos y complejos, ubicados en zonas donde la geología es altamente variable y las condiciones hidrogeotécnicas pueden cambiar en cuestión de metros. En escenarios como el Túnel Punta Olímpica, la combinación de macizos rocosos heterogéneos, variaciones de humedad, fracturamiento irregular y surgencias de agua obliga a realizar estudios detallados que permitan entender el comportamiento del terreno durante la excavación, ya que la permeabilidad del macizo influye directamente en la estabilidad, en el nivel de sostenimiento requerido y en la seguridad de la obra. Debido a que los proyectos subterráneos situados en alta montaña están expuestos a cambios bruscos en presión hidráulica, anisotropías litológicas y procesos de debilidad estructural, resulta indispensable caracterizar con precisión las condiciones del macizo para disminuir la incertidumbre y anticipar zonas críticas. Esta investigación se orienta justamente a analizar la permeabilidad a lo largo del túnel, interpretando cómo la litología, el grado de fracturamiento y la saturación determinan el comportamiento hidrogeomecánico del terreno y condicionan la toma de decisiones ingenieriles. Para ello se integran registros de campo, ensayos Lugeon, perfiles sísmicos y clasificaciones geomecánicas, apoyados en software especializado y en la revisión técnica vigente nacional e internacional, con el fin de obtener una caracterización realista y sustentada de cada tramo excavado.

El estudio se organiza siguiendo la estructura establecida en el índice. En el capítulo I se expone el planteamiento del problema, las preguntas de investigación, la justificación técnica y los objetivos que guían el trabajo, estableciendo el contexto geotécnico y la relevancia del análisis de permeabilidad dentro de un túnel de alta montaña. El capítulo II presenta el marco referencial, en el que se revisan

antecedentes especializados, la normativa aplicable y las definiciones conceptuales relacionadas con permeabilidad, macizos rocosos, ensayos hidráulicos y comportamiento hidrogeomecánico. El capítulo III describe la metodología empleada, detallando el tipo y nivel de investigación, el diseño adoptado, las etapas del proyecto, las herramientas utilizadas y la evaluación técnica que sustenta la factibilidad del estudio. En el capítulo IV se desarrollan los resultados obtenidos, organizados según los objetivos específicos: primero, la caracterización general del macizo y sus propiedades hidráulicas; luego, la identificación de variaciones empíricas de permeabilidad entre tramos; y finalmente, el análisis de los cambios geomecánicos asociados a dichos patrones, interpretados con apoyo de la evidencia instrumental. Para concluir, el capítulo V reúne las conclusiones y recomendaciones derivadas del análisis, destacando los aportes del estudio para futuros diseños de soporte, estrategias de drenaje y planificación en obras subterráneas similares en entornos de montaña.

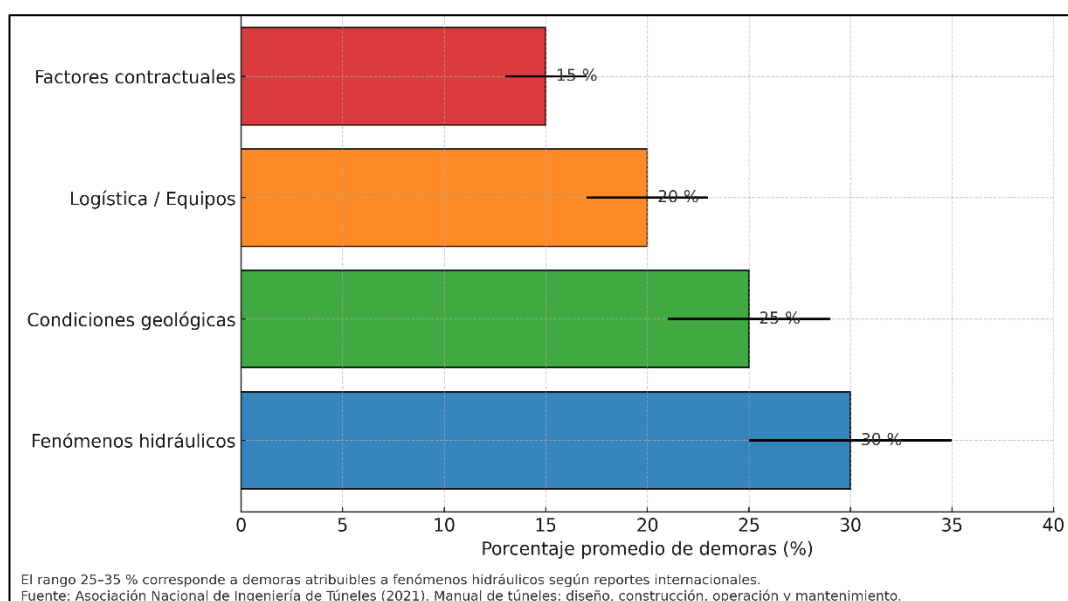
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel internacional, la permeabilidad de macizos rocosos es un factor determinante para la estabilidad hidráulica en túneles y obras subterráneas, según la Asociación Nacional de Ingeniería de Túneles (2021) muestran que la presencia de agua en discontinuidades puede aumentar el flujo interno del macizo rocoso, provocando filtraciones, deformaciones y comprometiendo el control del frente de excavación, asimismo, en zonas montañosas del mundo, los retrasos relacionados con fenómenos hidráulicos no previstos representan entre el 25 % y 35 % del total de las demoras en túneles, lo que resalta la necesidad de una caracterización cuantitativa rigurosa.

Figura 1

Distribución estimada de causas de demora en túneles de montaña



		A			A					
		L			L					
TOTA	174.	27.	22.7	4.72	27.	6.6	21.1	11	3.8	115.
L	708,	46	36,1	3,9	75	25,	27,5	9.4	02,	693,
	5	0,0			2,4	0		96,	5	6
								1		
Amazo	3.69	1.1	849,	306,	58	114	470,	1.9	7,2	1.95
nas	8,5	55,	4	3	5,1	,8	3	57,		0,5
		7						7		
Áncas	10.7	1.8	1.43	448,	1.2	526	696,	7.6	114	7.51
h	39,8	84,	6,0	9	22,	,7	1	32,	,9	7,3
		9			7			1		
Apurí	8.20	1.2	1.04	234,	1.2	255	1.04	5.6	18,	5.60
mac	9,3	83,	8,3	8	98,	,7	3,2	27,	3	9,0
		1			9			3		
Arequi	10.3	1.4	1.22	272,	1.7	1.0	742,	7.0	582	6.48
pa	18,0	95,	2,3	9	52,	10,	8	69,	,8	7,1
		2			9	2		9		
Ayacu	12.5	1.8	1.72	73,5	1.7	307	1.47	8.9	116	8.84
cho	51,9	01,	7,7		86,	,2	9,4	64,	,9	7,3
		1			6			2		
Cajam	15.7	1.7	1.52	204,	93	97,	839,	13.	349	12.6
arca	01,1	34,	9,7	3	6,6	0	6	03	,4	81,2
		0						0,6		
Callao	51,7	44,	44,8	0,0	6,9	5,2	1,7	0,0	0,0	0,0
		8								
Cusco	17.4	2.0	1.66	355,	2.7	769	1.97	12.	300	12.4
	85,5	20,	5,0	2	46,	,8	6,9	71	,5	18,0
		3			8			8,5		
Huanc	8.30	1.4	1.19	253,	2.0	213	1.79	4.8	124	4.73
avelica	4,0	44,	0,9	5	04,	,2	1,2	55,	,4	0,7
		4			4			2		
Huánu	8.00	1.3	929,	375,	79	6,6	785,	5.9	97,	5.80
co	0,4	05,	6	6	2,2		6	02,	4	5,5
		2						9		
Ica	3.71	69	696,	2,1	74	117	629,	2.2	200	2.07
	6,2	8,2	1		7,0	,8	3	71,	,8	0,2
								0		
Junín	12.0	1.7	1.07	713,	1.1	118	996,	9.1	357	8.81
	78,0	87,	3,3	9	15,	,5	8	75,	,2	8,3
		2			3			5		
La	8.93	1.3	949,	386,	1.9	106	1.83	5.6	165	5.49
Libert	5,8	35,	5	0	40,	,8	4,0	59,	,8	3,8
ad		5			8			6		

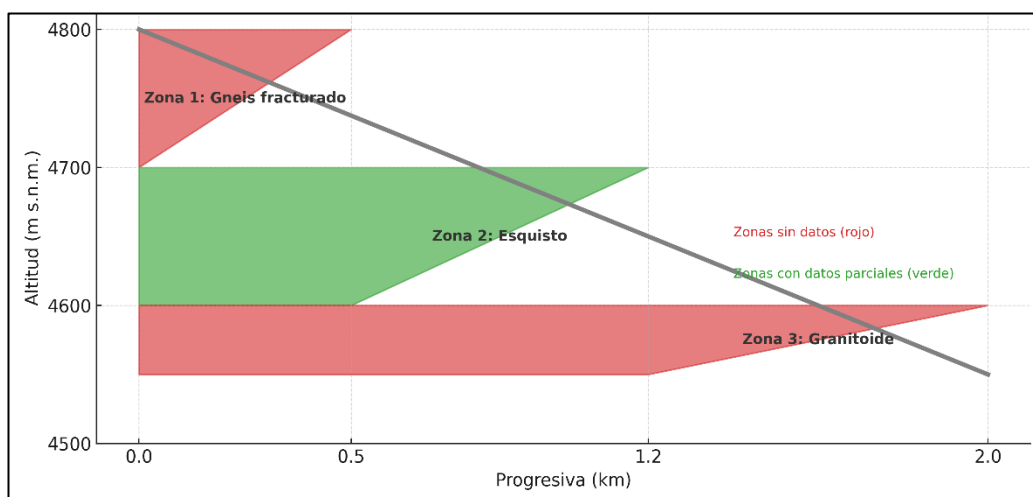
Lambayeque	3.26 9,0	51 5,1	450, 6	64,5	68 9,7	210 ,0	479, 7	2.0 64, 2	38, 8	2.02 5,4
Lima	7.61 3,4	1.6 84, 6	1.39 5,0	289, 6	1.5 98, 9	191 ,9	1.40 7,1	4.3 29, 9	160 ,0	4.16 9,8
Loreto	972, 2	12 8,9	88,6	40,3	32 0,7	97, 2	223, 6	52 2,6	88, 4	434, 1
Madre de Dios	2.04 9,3	39 9,4	399, 4	0,0	34 0,0	88, 0	252, 0	1.3 09, 8	6,4	1.30 3,4
Moquegua	2.93 9,0	47 0,3	470, 3	0,0	90 4,6	239 ,8	664, 7	1.5 64, 1	157 ,8	1.40 6,3
Pasco	3.66 1,4	56 4,3	373, 8	190, 6	91 2,6	34, 2	878, 4	2.1 84, 4	19, 3	2.16 5,2
Piura	8.96 2,5	1.7 79, 8	1.66 6,8	112, 9	63 7,0	170 ,0	467, 0	6.5 45, 8	387 ,6	6.15 8,2
Puno	13.6 54,5	2.0 20, 8	1.80 6,2	214, 6	2.3 56, 8	1.4 35, 9	920, 9	9.2 77, 0	116 ,7	9.16 0,2
San Martín	5.60 3,3	81 5,1	770, 6	44,5	96 5,3	192 ,7	772, 6	3.8 22, 9	53, 1	3.76 9,8
Tacna	2.64 9,7	63 0,7	594, 5	36,2	48 7,4	177 ,1	310, 3	1.5 31, 7	296 ,3	1.23 5,4
Tumbes	1.01 0,1	13 8,5	138, 5	0,0	28 7,5	99, 0	188, 4	58 4,1	40, 1	544, 0
Ucayali	2.53 3,8	32 2,9	219, 0	103, 8	1.3 15, 7	39, 8	1.27 5,9	89 5,2	2,3	892, 9

Nota. Ministerio de Transportes y Comunicaciones, “Estadística de infraestructura de transportes: infraestructura vial”, 2024.

En el ámbito local, el Túnel Punta Olímpica, en Áncash, carece de estudios actuales que describan empíricamente la permeabilidad del macizo rocoso a lo largo de su trazo ni su variación espacial, es por ello que, sin esa información el diseño de drenajes y sostenimientos se basa en supuestos genéricos que pueden subestimar o sobreestimar los efectos del agua, el cual puede desencadenar filtraciones inesperadas, sobrepresiones en el revestimiento, retrasos en el avance y costos adicionales en obra, de este modo, el problema central es la carencia de un análisis cuantitativo actualizado que relacione la permeabilidad del macizo con el desempeño real de la excavación en el túnel Punta Olímpica, generando incertidumbre técnica y económica para su ejecución segura.

Figura 2

Trazo del Túnel Punta Olímpica y sectores sin registro de permeabilidad



Nota. Elaboración propia con base en MTC, 2025

Tabla 2

Disponibilidad de ensayos geotécnicos y de permeabilidad en el Túnel Punta Olímpica

Sección del túnel (PK)	Tipo de roca	Ensayos realizados	Ensayos de permeabilidad	Observaciones
0+000	–	Gneis	Sí	No
0+500	fracturado			Sin registros Lugeon

0+500	–	Esquisto	Sí	Parcial	Ensayos
1+200					puntuales
1+200	–	Granitoide	Sí	No	Requiere
2+000					caracterización

Nota. Elaboración propia

La figura 2 y la tabla 2 evidencian que el Túnel Punta Olímpica atraviesa macizos de composición variable donde se alternan zonas de gneis fracturado, esquistos y granitoides, sin embargo la información disponible sobre la permeabilidad del terreno es discontinua y limitada, por ello se aprecia que solo en ciertos tramos se realizaron ensayos puntuales mientras que en la mayoría del recorrido no existen registros directos de pruebas Lugeon o presiómetros, lo cual genera vacíos técnicos para el diseño de drenajes y sostenimientos, de modo que la caracterización del macizo resulta imprescindible para reducir los riesgos de filtraciones, sobrepresiones y retrasos constructivos que podrían comprometer la estabilidad y seguridad de la obra.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema principal

¿De qué manera la caracterización y el análisis descriptivo de la permeabilidad del macizo rocoso inciden en la excavación del Túnel Punta Olímpica, Áncash, 2025?

1.2.2 Problemas secundarios

- a) ¿Cómo se caracteriza el macizo en términos de fracturamiento, conductividad hidráulica y grado de saturación en la excavación del Túnel Punta Olímpica, Áncash, 2025?
- b) ¿Qué variaciones empíricas de permeabilidad se presentan a lo largo de los distintos tramos de la excavación del túnel?

- c) ¿Qué influencia tiene la permeabilidad observada en la estabilidad y en el tipo de sostenimiento aplicado durante la excavación?

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Desde una perspectiva social, la investigación poseyó un alto valor estratégico y comunitario, ya que el Túnel Punta Olímpica representó una infraestructura esencial para la integración vial y económica entre el Callejón de Huaylas y la zona de Conchucos, de modo que la correcta ejecución garantizó la conectividad entre poblaciones altoandinas, lo cual facilitó el acceso a servicios básicos y fomentó el comercio regional, aparte de ello, asegurar la estabilidad del túnel mediante un conocimiento técnico confiable de la permeabilidad del macizo contribuyó directamente a la seguridad de los trabajadores, la sostenibilidad del proyecto y la protección de las comunidades aledañas.

Asimismo, la investigación reforzó el compromiso con la gestión responsable de la infraestructura pública, de modo que buscó reducir los riesgos asociados a filtraciones, fallas o colapsos estructurales que podrían afectar el tránsito y la economía regional, es por ello que el estudio promovió el bienestar colectivo al garantizar la operatividad y durabilidad de una obra de alto impacto social, tal como señaló el Ministerio de Transportes y comunicaciones (2025) el fortalecimiento de la red vial en Áncash fue fundamental para acortar distancias, dinamizar la economía local y mejorar la calidad de vida de sus habitantes, objetivos a los que esta investigación contribuyó de manera directa.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Analizar la caracterización y el análisis descriptivo de la permeabilidad del macizo rocoso en la excavación del Túnel Punta Olímpica, Áncash, 2025.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Determinar la caracterización del macizo en términos de fracturamiento, conductividad hidráulica y grado de saturación.
- b) Identificar las variaciones empíricas de permeabilidad a lo largo de los distintos tramos de excavación.
- c) Evaluar la influencia de la permeabilidad en la estabilidad y el sostenimiento aplicado en la excavación del túnel.

CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Machado et al. (2025), en su investigación tuvo como objetivo evaluar la permeabilidad y el potencial de infiltración del macizo rocoso en obras subterráneas mediante un sistema de mapeo geológico avanzado combinado con simulaciones de flujo tridimensional, la metodología fue cuantitativa con enfoque descriptivo aplicado a túneles excavados en formaciones metamórficas, la población fue el conjunto de sectores del túnel analizado durante la fase constructiva, la muestra fue conformada por zonas representativas de cada tipo litológico y grado de fracturamiento, los principales resultados fueron que la heterogeneidad del macizo y la orientación de las discontinuidades explican hasta el 70 % de la variación de caudales infiltrados, se concluyó que el uso de modelos numéricos acoplados a observaciones de campo mejora significativamente la predicción de filtraciones, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que prioriza un análisis descriptivo empírico sustentado en mediciones in situ para definir la permeabilidad efectiva.

Song et al. (2024), en su investigación tuvo como objetivo estimar la permeabilidad del macizo rocoso a partir de la relación entre el tiempo de relajación y la velocidad de onda P en rocas graníticas de baja permeabilidad, la metodología fue cuantitativa y basada en ensayos de laboratorio complementados con modelamiento numérico, la población fue un conjunto de núcleos de perforación extraídos de diferentes profundidades de un túnel experimental, la muestra fue seleccionada en función del grado de fracturamiento y humedad, los principales resultados fueron que el tiempo de relajación mostró una correlación inversa con la permeabilidad y permitió identificar zonas de mayor flujo hidráulico dentro del macizo, se concluyó que este método indirecto es confiable para predecir

variaciones espaciales de permeabilidad en túneles profundos, en contraste con la investigación actual que aplica ensayos de campo como el Lugeon para correlacionar directamente la conductividad hidráulica con la excavación del túnel Punta Olímpica, Áncash 2025.

Xin et al. (2024), en su investigación tuvo como objetivo analizar las características espacio-temporales del ingreso de agua en túneles de roca dura atravesados por zonas de falla, la metodología fue cuantitativa con base en datos de monitoreo de presión, caudal y temperatura del agua subterránea durante la excavación, la población fue el conjunto de túneles chinos de alta montaña incluidos en el programa de observación hidrogeológica, la muestra fue el túnel de prueba con mayor grado de fracturamiento y saturación, los principales resultados fueron que la velocidad de ingreso y la magnitud del flujo dependen de la interconectividad de las fracturas y del gradiente hidráulico del entorno, se concluyó que la evaluación dinámica de la permeabilidad permite anticipar eventos de irrupción de agua, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que busca una caracterización estática-descriptiva como base para el diseño de sostenimientos y drenajes.

Ma et al. (2023), en su investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo de flujo agua-roca bifásico para el ingreso de agua y la inestabilidad del macizo en túneles de mina, la metodología fue cuantitativo-numérica con base en datos experimentales y simulaciones de flujo partículas-agua en roca fisurada, la población fue el conjunto de excavaciones subterráneas en túneles de minería y la muestra consistió en un túnel en zona de falla con alto gradiente hidráulico, los principales resultados indicaron que la migración de partículas finas dentro de las fracturas aumenta rápidamente la porosidad y la permeabilidad, y que la presión de poros descende con el tiempo, se concluyó que el modelado avanzado del flujo en masa rocosa mejora notablemente la precisión de predicción de eventos de ingreso, medida que difiere del enfoque del túnel Punta Olímpica que se concentra en mediciones in situ de permeabilidad para describir el comportamiento del macizo

Wang et al. (2022), en su investigación tuvo como objetivo analizar los mecanismos de evolución del agua y la permeabilidad en túneles de rocas fracturadas y fallas, la metodología fue cuantitativa experimental y numérica, la población la constituyeron túneles en zonas de falla de roca de la industria minera y la muestra fue un túnel de montaña con alta saturación en la masa rocosa, los principales resultados mostraron que la permeabilidad del macizo rocoso en zonas de falla aumentó gradualmente durante la excavación, indicando activación hidráulica del entorno, se concluyó que los ensayos dinámicos de permeabilidad son esenciales para anticipar la inestabilidad hidráulica, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que busca una caracterización estática-descriptiva como base para el diseño de sostenimientos y drenajes.

Mendoza (2024), en su investigación tuvo como objetivo caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso para controlar la estabilidad en la Unidad Minera Cobriza considerando la influencia de la humedad y la permeabilidad, la metodología fue cuantitativa con aplicación de observación estructurada y registro de discontinuidades, la población fue conformada por los taludes subterráneos del nivel de producción, la muestra fue seleccionada en base a sectores con presencia de agua subterránea y variación de litología, los principales resultados fueron que la saturación y la orientación de las fracturas afectan directamente la resistencia y el comportamiento del macizo, se concluyó que la evaluación de la permeabilidad debe integrarse al análisis de estabilidad, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que busca medirla mediante ensayos hidráulicos para relacionarla con el desempeño del revestimiento y la eficiencia del sostenimiento.

Osorio y Machaca (2023), en su investigación tuvo como objetivo incorporar el parámetro de permeabilidad del macizo rocoso en el diseño de sostenimientos subterráneos en excavaciones mineras, la metodología fue cuantitativa de tipo descriptiva apoyada en la clasificación geomecánica RMR y GSI, la población fue los frentes de avance de una galería minera en Cusco, la muestra fue compuesta por 18 estaciones de observación geotécnica, los principales resultados fueron que la presencia de humedad y la permeabilidad alta modifican el

comportamiento de carga del macizo, se concluyó que el control de filtraciones debe integrarse al diseño de anclajes y pernos, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que aborda la permeabilidad como variable principal y no solo como factor complementario de diseño.

Bazán (2023), en su investigación tuvo como objetivo caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso del túnel en proyección en el portal de entrada, la metodología fue cuantitativa-descriptiva basada en mapeo de discontinuidades, ensayos de laboratorio y análisis estructural, la población fue el macizo rocoso del túnel peruano del estudio de caso y la muestra consistió en el sector de portal con mayor densidad de fracturas, los principales resultados indicaron presencia significativa de diaclasas y zonas alteradas, se concluyó que la caracterización del macizo proporciona la base para el diseño de sostenimiento, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que pretende una caracterización más amplia estática-descriptiva del macizo rocoso.

Gutiérrez Mendivil (2022), en su investigación tuvo como objetivo evaluar geomecánicamente el macizo rocoso en operaciones subterráneas de minería en Perú, la metodología fue cuantitativa de tipo aplicada con diseño no experimental, la población fueron túneles e excavaciones mineras en roca peruanas y la muestra fue un túnel específico con registro de ensayos en campo de estabilidad, los principales resultados mostraron que el macizo se clasificó principalmente como tipo III-A a III-B según calidad geomecánica y se recomendó pernos y sostén de hormigón proyectado, se concluyó que el análisis geomecánico detallado es crítico para la seguridad operativa, lo cual difiere del enfoque del túnel Punta Olímpica que busca medir permeabilidad y caracterizar el macizo para diseño de drenajes y sostenimientos.

Cantos y Pinargote (2021), en su investigación tuvo como objetivo analizar empíricamente la permeabilidad del macizo rocoso y su relación con las propiedades geomecánicas en la excavación de un túnel de transporte, la metodología fue cuantitativa con aplicación de ensayos Lugeon y registros

geológicos de campo, la población fue el conjunto de secciones del túnel central de Guayas en Ecuador, la muestra fue conformada por intervalos de 10 m seleccionados por tipo de roca, los principales resultados fueron que las zonas de mayor fracturamiento presentaron valores de permeabilidad superiores a los previstos por el diseño inicial, se concluyó que la caracterización hidrogeológica temprana permite reducir fallas en sostenimientos y sobre costos, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que amplía el enfoque a la relación entre permeabilidad, estabilidad y sostenimiento estructural.

Mendoza (2024), en su investigación tuvo como objetivo caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso para controlar la estabilidad en la Unidad Minera Cobriza considerando la influencia de la humedad y la permeabilidad, la metodología fue cuantitativa con aplicación de observación estructurada y registro de discontinuidades, la población fue conformada por los taludes subterráneos del nivel de producción, la muestra fue seleccionada en base a sectores con presencia de agua subterránea y variación de litología, los principales resultados fueron que la saturación y la orientación de las fracturas afectan directamente la resistencia y el comportamiento del macizo, se concluyó que la evaluación de la permeabilidad debe integrarse al análisis de estabilidad, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que busca medirla mediante ensayos hidráulicos para relacionarla con el desempeño del revestimiento y la eficiencia del sostenimiento.

Osorio y Machaca (2023), en su investigación tuvo como objetivo incorporar el parámetro de permeabilidad del macizo rocoso en el diseño de sostenimientos subterráneos en excavaciones mineras, la metodología fue cuantitativa de tipo descriptiva apoyada en la clasificación geomecánica RMR y GSI, la población fue los frentes de avance de una galería minera en Cusco, la muestra fue compuesta por 18 estaciones de observación geotécnica, los principales resultados fueron que la presencia de humedad y la permeabilidad alta modifican el comportamiento de carga del macizo, se concluyó que el control de filtraciones debe integrarse al diseño de anclajes y pernos, en contraste con la investigación del

túnel Punta Olímpica que aborda la permeabilidad como variable principal y no solo como factor complementario de diseño.

Bazán (2023), en su investigación tuvo como objetivo caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso del túnel en proyección en el portal de entrada, la metodología fue cuantitativa-descriptiva basada en mapeo de discontinuidades, ensayos de laboratorio y análisis estructural, la población fue el macizo rocoso del túnel peruano del estudio de caso y la muestra consistió en el sector de portal con mayor densidad de fracturas, los principales resultados indicaron presencia significativa de diaclasas y zonas alteradas, se concluyó que la caracterización del macizo proporciona la base para el diseño de sostenimiento, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que pretende una caracterización más amplia estática-descriptiva del macizo rocoso.

Gutiérrez Mendivil (2022), en su investigación tuvo como objetivo evaluar geomecánicamente el macizo rocoso en operaciones subterráneas de minería en Perú, la metodología fue cuantitativa de tipo aplicada con diseño no experimental, la población fueron túneles e excavaciones mineras en roca peruanas y la muestra fue un túnel específico con registro de ensayos en campo de estabilidad, los principales resultados mostraron que el macizo se clasificó principalmente como tipo III-A a III-B según calidad geomecánica y se recomendó pernos y sostén de hormigón proyectado, se concluyó que el análisis geomecánico detallado es crítico para la seguridad operativa, lo cual difiere del enfoque del túnel Punta Olímpica que busca medir permeabilidad y caracterizar el macizo para diseño de drenajes y sostenimientos.

Cantos y Pinargote (2021), en su investigación tuvo como objetivo analizar empíricamente la permeabilidad del macizo rocoso y su relación con las propiedades geomecánicas en la excavación de un túnel de transporte, la metodología fue cuantitativa con aplicación de ensayos Lugeon y registros geológicos de campo, la población fue el conjunto de secciones del túnel central de Guayas en Ecuador, la muestra fue conformada por intervalos de 10 m

seleccionados por tipo de roca, los principales resultados fueron que las zonas de mayor fracturamiento presentaron valores de permeabilidad superiores a los previstos por el diseño inicial, se concluyó que la caracterización hidrogeológica temprana permite reducir fallas en sostenimientos y sobrecostos, en contraste con la investigación del túnel Punta Olímpica que amplía el enfoque a la relación entre permeabilidad, estabilidad y sostenimiento estructural.

2.2 NORMATIVA VIGENTE

- Reglamento Nacional de Edificaciones – Normas E.050 “Suelos y Cimentaciones” y E.070 “Albañilería” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018): Establecen los lineamientos técnicos para la clasificación de suelos y rocas, los criterios de estabilidad en obras civiles y los procedimientos de investigación geotécnica, aplicables al estudio de permeabilidad y comportamiento del macizo rocoso.
- Decreto Supremo N.º 024-2016-EM, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería: Regula la seguridad en excavaciones subterráneas, el control de filtraciones, el drenaje de túneles y el monitoreo de presiones de agua, garantizando condiciones seguras durante la ejecución de ensayos hidráulicos y mediciones piezométricas.
- Manual de Carreteras – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018): Parámetros de diseño geotécnico, los procedimientos de investigación de túneles y la metodología.
- Norma ASTM D5088-02 (Reapproved 2016): Describe el método para la identificación y clasificación de discontinuidades en macizos rocosos.
- Norma ASTM D6032-17: Establece las prácticas normalizadas para la ejecución de pruebas de permeabilidad en perforaciones, proporcionando un marco comparativo para los resultados de ensayos Lugeon realizados in situ.
- Recomendaciones de la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 2020): Brindan criterios internacionales para la caracterización

geomecánica del macizo y la evaluación de su permeabilidad mediante ensayos hidráulicos, asegurando la compatibilidad técnica de los resultados.

- Ley N.º 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental: Obliga a incorporar parámetros hidrogeológicos y geotécnicos en la evaluación de proyectos de infraestructura, promoviendo la prevención de impactos ambientales derivados de filtraciones o alteraciones del flujo subterráneo.

2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS

Variable independiente: Permeabilidad del macizo rocoso, capacidad del macizo para permitir el paso del agua a través de sus poros y fracturas interconectadas (Xin et al., 2024).

Indicador 1: Densidad de fracturas, número de fracturas por metro lineal que condiciona el grado de permeabilidad y la estabilidad estructural (Qiao et al., 2024).

Indicador 2: Orientación de fracturas, dirección y buzamiento de las discontinuidades que controlan el flujo subterráneo y la respuesta mecánica del macizo (Shu y Zeng, 2024).

Indicador 3: Valor de permeabilidad (m/s), magnitud que cuantifica la conductividad hidráulica del macizo, obtenida mediante ensayos Lugeon en perforaciones (Pengshuai et al., 2024).

Indicador 4: Caudal de infiltración (L/s), volumen de agua que atraviesa el macizo por unidad de tiempo, reflejando su capacidad de filtración (Ghasvareh et al., 2024).

Indicador 5: Porcentaje de humedad en la roca, proporción de agua contenida en los poros del material rocoso, vinculada con su grado de saturación (Zhengzheng et al., 2024).

Indicador 6: Presión de poros (kPa), esfuerzo interno generado por el agua en los vacíos del macizo que influye en su estabilidad global (Wang et al., 2024).

Variable dependiente: Excavación del túnel, proceso constructivo que implica la remoción controlada del macizo rocoso para conformar una estructura subterránea estable (Lee et al., 2024).

Indicador 1: Metros lineales excavados por día, medida del avance diario de excavación que refleja la eficiencia operativa y las condiciones geotécnicas del terreno (Hu et al., 2024).

Indicador 2: Retrasos acumulados (días), diferencia entre el cronograma proyectado y el avance real, influida por filtraciones y condiciones del macizo (C. Wang et al., 2024).

Indicador 3: Eventos de inestabilidad, ocurrencias de derrumbes, desprendimientos o deformaciones que evidencian la respuesta estructural del macizo ante la excavación (Liang et al., 2024).

Indicador 4: Nivel de convergencia (cm), deformación lateral o cierre del túnel causada por el reajuste del macizo tras la remoción de material (Wang et al., 2024).

Indicador 5: Tipo y cantidad de pernos o anclajes, elementos de sostenimiento empleados para reforzar la estabilidad del macizo y controlar movimientos indeseados (He et al., 2024).

Indicador 6: Espesor del revestimiento (cm), grosor del concreto proyectado o lanzado que asegura la resistencia, impermeabilidad y durabilidad del túnel (Fu et al., 2024).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA

3.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicada, porque buscó responder a una problemática práctica vinculada a la estabilidad y sostenibilidad del Túnel Punta Olímpica, asimismo, su nivel fue descriptivo, ya que pretendió caracterizar, medir y detallar las propiedades del macizo rocoso sin manipular las variables, limitándose a observar y describir su comportamiento natural en el proceso de excavación (Pozo, 2024).

3.1.2 Nivel de investigación

El diseño fue no experimental de corte transversal, debido a que no se intervino sobre las variables, sino que se midieron tal como se manifestaron en el campo, así también, la recolección de datos se llevó a cabo en un periodo único, lo que permitió obtener un diagnóstico preciso y actualizado de las condiciones hidrogeológicas y geomecánicas del macizo (Manterola et al., 2023).

3.1.3 Justificación del enfoque aplicado

El enfoque aplicado se justificó porque la investigación buscó atender una necesidad real relacionada con la estabilidad del Túnel Punta Olímpica, aprovechando los datos obtenidos para mejorar la toma de decisiones durante la excavación. Este enfoque permitió que el estudio aportara información útil para reducir riesgos, fortalecer la seguridad y asegurar el funcionamiento adecuado de una obra clave para la región, haciendo que los resultados tuviesen un uso práctico y un impacto directo en la gestión del proyecto.

3.2 DISEÑO DEL PROYECTO

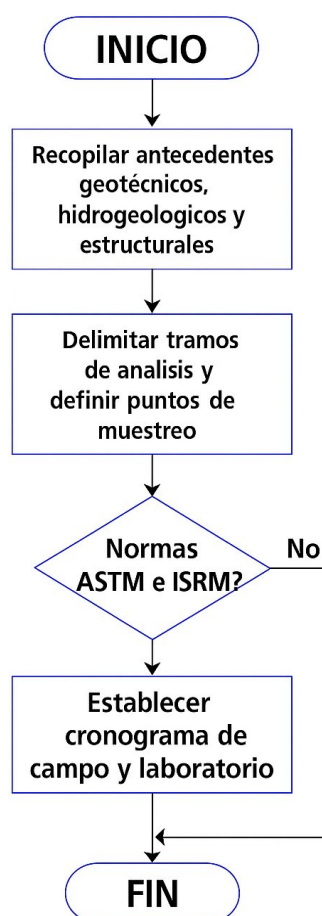
3.2.1 Etapas del proyecto

Primera etapa: Revisión documental y planificación técnica.

En esta fase se recopilaban antecedentes geotécnicos, hidrogeológicos y estructurales del Túnel Punta Olímpica, incluyendo informes previos de excavación, planos topográficos, registros de perforaciones y estudios del MTC, además, se realizó la delimitación de los tramos de análisis y la definición de los puntos de muestreo, estableciendo el cronograma de trabajo de campo y laboratorio conforme a las normas ASTM e ISRM.

Figura 3

Flujograma de la Etapa 1: Revisión documental y planificación técnica



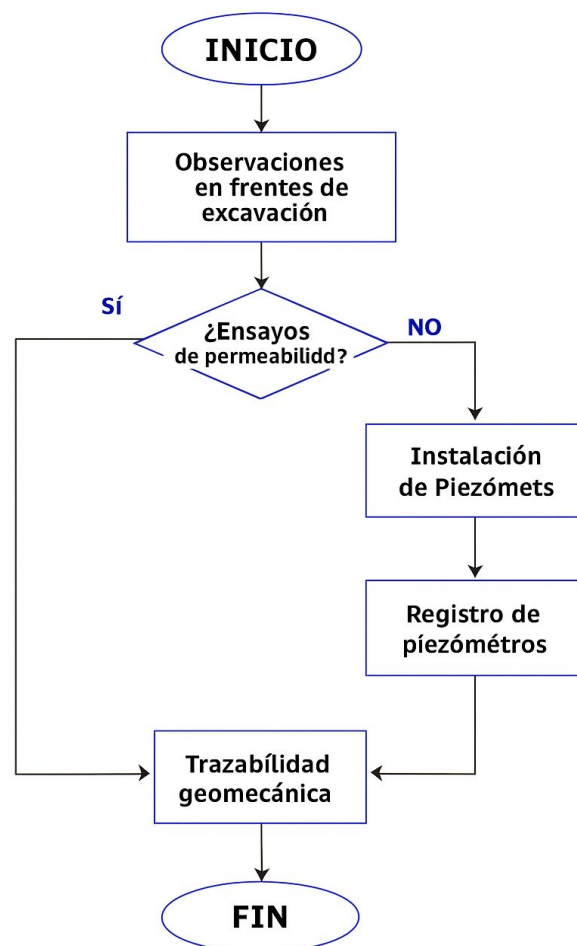
Nota. Elaboración propia

Segunda etapa: Trabajo de campo y toma de datos geotécnicos.

Esta etapa comprendió la ejecución de observaciones estructuradas en los frentes de excavación para identificar la densidad, orientación y tipo de fracturas presentes, así como el grado de saturación visible. Se realizaron ensayos de permeabilidad tipo Lugeon en perforaciones seleccionadas para determinar la conductividad hidráulica del macizo, y se instalaron piezómetros de lectura continua para registrar la presión de poros y el caudal de infiltración, asegurando la trazabilidad de las mediciones con fichas de campo geomecánico.

Figura 4

Flujograma de la Etapa 2: Trabajo de campo y toma de datos geotécnicos



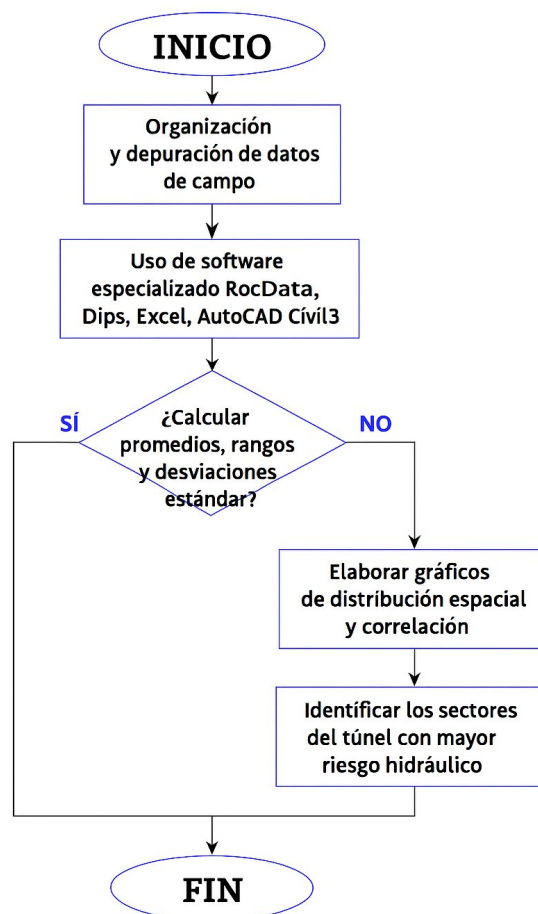
Nota. Elaboración propia

Tercera etapa: Procesamiento y análisis de datos.

En gabinete se efectuó la sistematización y depuración de la información obtenida en campo mediante software especializado como RocData, Dips, Excel y AutoCAD Civil 3D, con el propósito de calcular promedios, rangos y desviaciones estándar de los parámetros medidos. Posteriormente se elaboraron gráficos de distribución espacial y correlación entre permeabilidad, grado de fracturamiento y estabilidad estructural, identificando los sectores del túnel con mayor riesgo hidráulico.

Figura 5

Flujograma de la Etapa 3: Procesamiento y análisis de datos



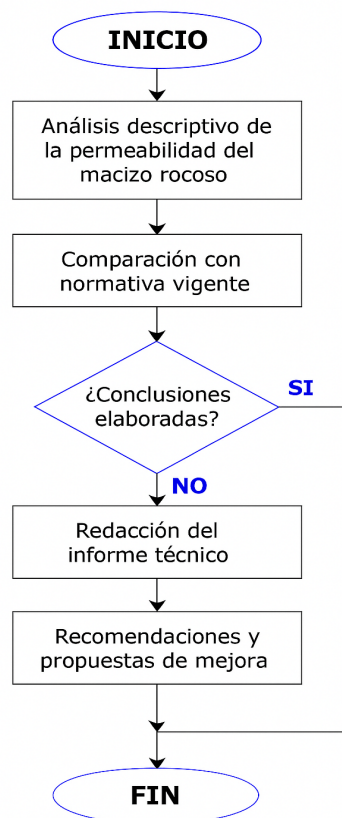
Nota. Elaboración propia

Cuarta etapa: Interpretación de resultados y elaboración del informe técnico.

Finalmente, se desarrolló el análisis descriptivo integral de la permeabilidad del macizo rocoso y su incidencia en la excavación del túnel, comparando los resultados con la normativa nacional e internacional aplicable. Se elaboró el informe técnico con las conclusiones, recomendaciones y propuestas de mejora en los sistemas de drenaje y sostenimiento, contribuyendo a la optimización de la gestión geotécnica y de seguridad en obras subterráneas de alta montaña.

Figura 6

Flujograma de la Etapa 4: Interpretación de resultados y elaboración del informe técnico



Nota. Elaboración propia

3.2.2 Herramientas y/o software utilizado

Para la obtención de los datos en la excavación del túnel se utilizaron equipos geotécnicos de precisión como el Lugeon tester, empleado en los ensayos de permeabilidad a presión para determinar la conductividad hidráulica del macizo rocoso. Se emplearon además piezómetros de lectura electrónica y de tubo abierto, destinados a registrar la presión de poros y el nivel freático en los sectores críticos de la excavación. La brújula geológica tipo Brunton permitió medir la orientación y buzamiento de las discontinuidades estructurales, mientras que el martillo geológico y las lupas de inspección sirvieron para describir texturas, fracturas y grado de alteración de las rocas. Se utilizaron también cilindros de muestreo sellados para conservar muestras con contenido de humedad natural, las cuales fueron evaluadas posteriormente en laboratorio mediante pruebas gravimétricas y determinación de humedad por secado controlado.

Para el procesamiento, interpretación y modelamiento de la información recolectada, se hizo uso de programas especializados tales como el software RocData 6.0, el cual se utilizó para la sistematización de propiedades geomecánicas y análisis de resistencia del macizo. Por otro lado, el AutoCAD se empleó para la elaboración de planos, secciones longitudinales y transversales del túnel, integrando los puntos de ensayo y zonas de monitoreo, mientras que el programa Microsoft Excel se utilizó para el tratamiento estadístico descriptivo de los datos, incluyendo el cálculo de promedios, desviaciones estándar y rangos de permeabilidad, mientras que ArcGIS Pro permitió representar los resultados en mapas georreferenciados y analizar espacialmente la distribución de la conductividad hidráulica.

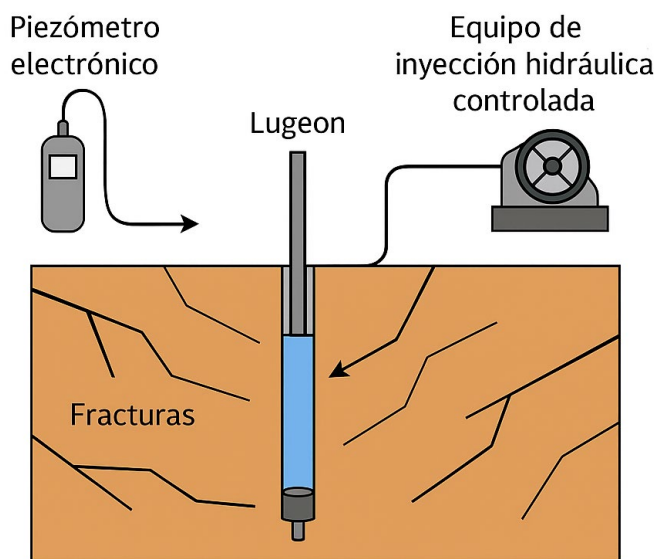
3.3 EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD

3.3.1 Evaluación técnica

El proyecto se sustentó en procedimientos que salvaguardan la calidad de los datos y la confiabilidad, además de enfocarse en ensayos de permeabilidad tipo Lugeon, mediciones piezométricas y observación estructurada, el cual responde a los lineamientos de la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 2020) y a las normas ASTM D6032-17 y ASTM D5088-02, lo que garantiza una caracterización del macizo rocoso coherente, representativa y científicamente verificable.

Figura 7

Esquema de instrumentación y ensayos de permeabilidad en el Túnel Punta



Nota. La imagen muestra los equipos empleados para la toma de datos geotécnicos y mediciones hidráulicas en campo, siguiendo los lineamientos de la ISRM (2020) y las normas ASTM aplicables.

Tabla 3

Normas internacionales aplicadas en la evaluación técnica del macizo rocoso

Norma / Lineamiento	Año	Tipo de ensayo	Parámetro medido	Aplicación en el proyecto
ISRM – International Society for Rock Mechanics	2020	Ensayos de permeabilidad y caracterización estructural	Conductividad hidráulica, fracturamiento y estabilidad del macizo	Base metodológica general para la evaluación del comportamiento hidráulico y estructural de la roca
ASTM D6032-17	2017	Ensayo de permeabilidad tipo Lugeon	Coeficiente de permeabilidad (K) y caudal (Q)	Determina la capacidad de filtración del macizo rocoso y calibra el modelo hidráulico
ASTM D5088-02	2002	Medición piezométrica y registro de presión de poros	Presión intersticial del agua en discontinuidades	Evalúa el comportamiento hidrogeológico local y los gradientes hidráulicos presentes

Nota. normas y lineamientos internacionales que respaldan la metodología del proyecto, asegurando trazabilidad, calidad de datos y cumplimiento de estándares técnicos reconocidos.

El uso de instrumentos calibrados como piezómetros electrónicos, equipos hidráulicos de inyección controlada y brújulas geológicas permitió registrar con precisión los parámetros de conductividad hidráulica, densidad de fracturas y presión de poros, mientras que el empleo de programas especializados como AutoCAD y ArcGIS Pro facilitó la integración de toda la información recolectada, permitiendo su representación espacial en tres dimensiones y el análisis estadístico descriptivo necesario para identificar patrones de comportamiento hidráulico dentro del macizo.

Del mismo modo, la ubicación del Túnel Punta Olímpica dentro del corredor vial Carhuaz–Chacas–San Luis ofreció condiciones logísticas favorables, debido a que su accesibilidad y entorno controlado facilitaron las actividades de campo sin afectar el tránsito ni la seguridad operativa, por lo que el estudio se consideró técnicamente viable al basarse en métodos de observación y ensayo de bajo impacto ambiental, alta precisión y probada aplicación en proyectos de túneles de montaña.

3.3.2 Factibilidad

Al respecto, desde el punto de vista operativo el proyecto fue viable toda vez que contó con la colaboración del personal técnico del túnel responsable del mantenimiento y la contratación de profesionales locales especializados en geotecnia, logrando una optimización de recursos al evitar gastos en desplazamientos y alquiler de equipos no contemplados en el presupuesto. En cuanto a la parte económica, la inversión estimada fue posible de financiar en un contexto académico, lo cual se tradujo en el uso temporal de los instrumentos hidráulicos con que se contó, la instalación de piezómetros temporales y la obtención de licencias para un software técnico, hasta allí se manejaron recursos asequibles y disponibles en la ingeniería.

Tabla 4

Evaluación de la factibilidad técnica, económica y ambiental del proyecto

Dimensión	Criterio evaluado	Descripción técnica	Grado de factibilidad
Técnica	Recursos humanos y materiales	Colaboración de personal técnico del túnel y profesionales locales especializados en geotecnia	Alta
Económica	Disponibilidad de equipos y software	Uso temporal de instrumentos hidráulicos y licencias técnicas con financiamiento académico	Alta
Operativa	Condiciones logísticas y accesibilidad	Ubicación favorable del túnel en corredor vial Carhuaz–Chacas–San Luis	Alta

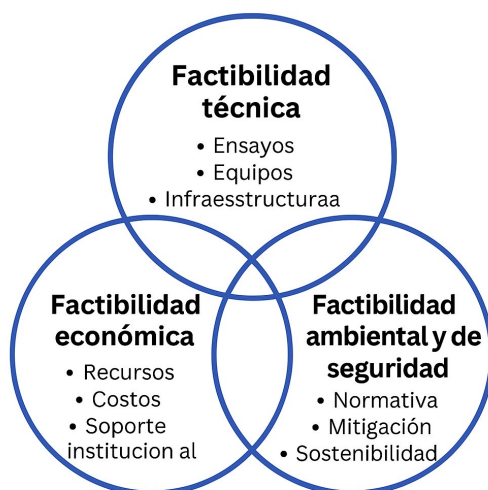
Ambiental y de seguridad	Cumplimiento normativo	Aplicación del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería y control de filtraciones	Alta
---------------------------------	------------------------	---	------

Nota. La tabla detalla los principales factores que sustentan la viabilidad del estudio, considerando los recursos disponibles, la accesibilidad operativa y el cumplimiento de normas ambientales y de seguridad.

En el ámbito ambiental y de seguridad, las actividades estuvieron configuradas según el enlace del Decreto Supremo del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Dadas las condiciones en las que se garantizó la seguridad del trabajo subterráneo, esto se relacionó principalmente con el control de filtraciones y la estabilidad de la tierra; ello garantizó que las mediciones se realizaran sin dañar las estructuras existentes ni el entorno circundante.

Figura 8

Interacción de los factores de factibilidad técnica, económica y ambiental del proyecto



Nota. La figura muestra la relación entre los tres ejes que sustentan la viabilidad del estudio.

El estudio demostró alta factibilidad técnica y económica, respaldada por recursos disponibles y métodos confiables. Su enfoque científico y aplicabilidad práctica fortalecieron su pertinencia. Además, aportó al conocimiento hidrogeológico del Túnel Punta Olímpica y promovió una gestión subterránea segura y sostenible.

3.4 PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN

3.4.1 Cronograma de actividades

Tabla 5

Plan de ejecución

Etapas	Descripción técnica de actividades	Objetivo operativo	Productos esperados
Etapa I: Revisión documental y planificación técnica	Compilación de información geológica, geotécnica e hidrogeológica existente del túnel, revisión de informes de avance, planos topográficos y estudios previos del MTC, además de la delimitación de sectores de muestreo y definición de la logística de campo.	Establecer la línea base del estudio y organizar la metodología de investigación conforme a normas ISRM y ASTM.	Matriz de planificación, fichas de control de campo, cronograma validado y mapa preliminar de zonas de muestreo.
Etapa II: Trabajo de campo medición parámetros geotécnicos	Ejecución de observaciones estructuradas, medición de densidad y orientación de fracturas, instalación de piezómetros y aplicación de ensayos Lugeon para determinar la permeabilidad del macizo rocoso.	Obtener datos directos y confiables sobre la conductividad hidráulica y el grado de saturación en los frentes de excavación.	Base de datos de campo, registros piezométricos, fichas de ensayo y fotografías geotécnicas documentadas.

Etapa III: Procesamiento y análisis de datos	Sistematización de la información con software ArcGIS Pro y Excel, cálculo de promedios y desviaciones estándar, y elaboración de gráficos de correlación y mapas de permeabilidad.	Procesar e interpretar los valores medidos para establecer patrones de variación hidráulica dentro del túnel.	Tablas estadísticas, planos georreferenciados de permeabilidad y gráficos de distribución espacial del macizo.
Etapa IV: Interpretación, validación y redacción del informe técnico	Contraste de resultados con normativa ISRM (2020) y ASTM (2017), formulación de conclusiones y recomendaciones, y elaboración del informe final con los hallazgos del estudio.	Integrar los resultados técnicos y proponer medidas para optimizar el diseño de sostenimientos y drenajes.	Informe técnico final, conclusiones validadas y propuesta de aplicación práctica para futuras obras subterráneas.

Nota. La planificación técnica se elaboró según la metodología propuesta por el investigador, siguiendo estándares de la ISRM (2020) y normas ASTM (2017) aplicadas a estudios geotécnicos de permeabilidad en túneles

Tabla 6*Cronograma*

Actividades			MES-1				MES-2				MES-3				MES-4				MES-5				MES-6			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión bibliográfica y planificación			X	X	X	X																				
Delimitación de zonas y selección de puntos de ensayo			X	X	X																					
Observaciones estructuradas en campo							X	X	X	X																
Ejecución de ensayos Lugeon y piezometría											X	X	X	X												
Procesamiento de datos y análisis estadístico															X	X	X	X								
Interpretación técnica y validación de resultados																			X	X	X	X				
Redacción del informe final y revisión académica																							X	X	X	X

Nota. El cronograma muestra la distribución temporal de las actividades proyectadas para el periodo en meses, considerando una secuencia lógica de fases semanales conforme al desarrollo técnico del estudio.

3.4.2 Asignación de recursos

Tabla 7*Recursos*

Ítem	Partida	Descripción técnica del recurso	Unidad de medida	Cantidad	Observaciones técnicas
1	Personal especializado	Ingeniero geotécnico con experiencia en mecánica de rocas y ensayos de permeabilidad	mes	2	Responsable del análisis técnico y validación de resultados
2	Personal auxiliar	Asistente de campo geotécnico con manejo de instrumentos de medición y fichas técnicas	mes	2	Apoyo en la toma de datos y control de fichas de campo
3	Instrumentación hidráulica	Piezómetros electrónicos y manuales, válvulas, manómetros y bombas de inyección	unidad	3	Para medición de presión de poros y permeabilidad in situ
4	Equipos auxiliares	Lugeon Brújula geológica Brunton, martillo, GPS, cinta métrica y cámaras fotográficas de alta resolución	lote	1	Registro estructural de discontinuidades y georreferenciación
5	Materiales de campo	Tubos, conectores, mangueras de alta presión y sellantes hidráulicos	lote	1	Implementación de los ensayos de permeabilidad y seguridad operativa

6	Software especializado	Licencias temporales de RocData, Dips, ArcGIS Pro y AutoCAD Civil 3D	paquete	1	Análisis geomecánico, representación espacial y modelamiento de datos
7	Transporte y logística	Vehículo de campo, combustible, alimentación y hospedaje técnico	lote	1	Movilización del personal y equipos hacia el túnel Punta Olímpica
8	Equipos de laboratorio	Estufa de secado, balanza de precisión, probeta y moldes de muestreo	lote	1	Ensayos de humedad y permeabilidad en muestras de roca
9	Material de seguridad	Casco, guantes dieléctricos, botas de seguridad, lentes protectores y chaleco reflectante	lote	1	Cumplimiento del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería
10	Recursos administrativos	Material de oficina, formatos de campo, almacenamiento digital y papelería técnica	lote	1	Soporte documental y control de registros de investigación

Nota. La asignación de recursos se elaboró conforme al enfoque metodológico del estudio y bajo las recomendaciones de la ISRM (2020) para la caracterización de macizos rocosos en obras subterráneas.

3.4.3 Costos y financiamiento

Tabla 8*Costo estimado*

Partida	Descripción	Subtotal (S/)	% del total
I. Preparación y planificación técnica	Revisión bibliográfica, delimitación de zonas, cronograma de actividades y permisos de campo	4,800	12.6
II. Trabajo de campo y mediciones geotécnicas	Ensayos Lugeon, piezometría, observaciones estructurales, toma de muestras y registro fotográfico	14,100	36.9
III. Procesamiento y análisis de datos	Procesamiento en RocData, Dips, ArcGIS y Excel, cálculo estadístico y correlaciones técnicas	6,700	17.5
IV. Interpretación, validación y redacción técnica	Comparación normativa, redacción del informe final, elaboración de gráficos y planos técnicos	5,600	14.7
V. Logística y difusión académica	Transporte, hospedaje, materiales, impresión, presentación y publicación del informe	7,000	18.3
Total general estimado (S/)		38,200	

Nota. Los costos se calcularon considerando valores promedio del mercado peruano de servicios geotécnicos y recursos académicos para 2025, con un margen de variación técnica de ± 10 % según requerimientos logísticos o condiciones de campo.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN Y EL ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA PERMEABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO EN LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL PUNTA OLÍMPICA, ÁNCASH, 2025.

El análisis integral de la permeabilidad del macizo rocoso permitió comprender cómo las características geológicas, la estructura de fracturación y el comportamiento hidráulico del terreno condicionaron la excavación a lo largo del eje del túnel, ya que la interacción entre litología, discontinuidades y presencia de agua definió patrones de flujo que variaron de forma marcada entre los diez tramos evaluados, lo que generó comportamientos que se reflejaron tanto en la estabilidad como en el tipo de sostenimiento aplicado.

Figura 9

Ubicación geográfica del Túnel Punta Olímpica dentro del corredor vial Carhuaz–Chacas–San Luis



La caracterización inicial mostró que las andesitas y granodioritas predominantes en varios sectores presentaron permeabilidad muy baja debido a su elevada compacidad, mientras que las zonas donde afloraron filitas y materiales con grados de meteorización más avanzados evidenciaron apertura de juntas y mayor interconexión de fracturas, lo que facilitó el paso del agua y elevó la permeabilidad local, situación que se identificó con claridad en los tramos T4, T7 y T9, donde se observaron filtraciones, humedad persistente y debilitamiento puntual del macizo.

Figura 10

Geología del túnel



El análisis del fracturamiento indicó que la densidad y orientación de las discontinuidades influyeron de manera directa en la permeabilidad, pues los sectores con mayor número de fracturas por metro coincidieron con los valores más elevados de infiltración, en cambio las zonas con estructuras masivas mostraron permeabilidad reducida y comportamiento estable, lo que evidencia que el flujo no dependió únicamente de la matriz rocosa sino de la conectividad de las redes de fracturas que actúan como canales preferenciales del agua.

Los resultados hidrogeotécnicos permitieron identificar tendencias espaciales claras, ya que la permeabilidad se mantuvo baja en los tramos iniciales y finales del túnel, mientras que aumentó en los sectores intermedios relacionados con litologías más blandas o con mayor grado de intemperismo, lo que generó una distribución heterogénea del flujo que responde tanto a la estructura geológica regional como al estado mecánico del macizo, de modo que el túnel no presentó una permeabilidad uniforme sino una variabilidad que sigue el patrón estructural de la montaña.

Finalmente, la relación entre permeabilidad, estabilidad y sostenimiento confirmó que las zonas con mayor presencia de agua exigieron soluciones más robustas, ya que la disminución de resistencia interna, el incremento de presiones locales y la pérdida de cohesión entre bloques generaron condiciones que requerían drenes, shotcrete de mayor espesor y refuerzo con mallas, mientras que los sectores con permeabilidad reducida permitieron mantener esquemas convencionales de soporte, por lo tanto la permeabilidad se consolidó como un factor determinante dentro del comportamiento del macizo y del diseño estructural aplicado en la excavación.

Este análisis integrado demuestra que la permeabilidad del macizo rocoso en el Túnel Punta Olímpica responde a la combinación de litología, fracturamiento y saturación, y que su variabilidad condicionó de manera directa la seguridad, la estabilidad y el sostenimiento empleado a lo largo del proceso constructivo, ofreciendo un panorama completo y coherente del comportamiento hidrogeotécnico del túnel.

Figura 11

Caracterización, permeabilidad, estabilidad y sostenimiento del macizo

Tra	Progr	Litolo	Fractura	Permea	Estabili	Sosteni	Interpret
mo	esiva	gía	miento	bilidad	dad	miento	ación

	(Km+)	domin ante		estimad a	observa da	aplicad o	integrad a
T1	49+08 0 – 49+18 0	Andesi ta	Moderad o	Muy baja	Alta estabili dad	Pernos + shotcret e básico	Comport amiento compacto con mínima presencia de agua
T2	49+18 0 – 49+28 0	Andesi ta– Filita	Moderad o–Alto	Baja	Buena estabili dad	Pernos ocasiona les	Humedad leve asociada a discontin uidades abiertas
T3	49+28 0 – 49+38 0	Grano diorita	Bajo	Muy baja	Muy estable	Shotcret e delgado	Roca competen te con flujo casi nulo
T4	49+38 0 – 49+48 0	Filita	Alto	Alta	Estabili dad reducid a	Shotcret e espeso + drenes + malla	Tramo crítico con fracturaci ón intensa y filtracion es persistent es

T5	49+48 0 – 49+58 0	Andesi ta	Moderad o	Moderad a	Estabili dad aceptabl e	Pernos sistemát icos	Zona de transición con infiltració n puntual
T6	49+58 0 – 49+68 0	Grano diorita	Bajo	Baja	Alta estabili dad	Sosteni miento mínimo	Masa rocosa sólida sin problema s hidráulic os
T7	49+68 0 – 49+78 0	Filita– Argilit a	Alto	Alta	Estabili dad compro metida	Drenes + shotcret e reforзад o	Saturació n recurrent e y pérdida de cohesión
T8	49+78 0 – 49+88 0	Andesi ta	Moderad o	Moderad a	Buena estabili dad	Shotcret e + pernos	Humedad superficia l controlad a
T9	49+88 0 – 49+98 0	Filita con relleno s	Alto	Moderad a–Alta	Estabili dad variable	Malla + shotcret e doble	Tramo débil con presencia de arcillas y flujo

							conectad o
T10	49+98	Grano	Bajo	Baja	Muy	Pernos	Condicio
	0 –	diorita			estable	+	n final
	50+08					shotcret	robusta y
	0					e	sin aporte
						estándar	significat
							ivo de
							agua

La tabla evidencia que los tramos desarrollados en andesita y granodiorita presentan un fracturamiento bajo a moderado, una permeabilidad muy baja a moderada y una estabilidad buena o alta que solo requiere pernos y shotcrete básico o mínimo, mientras que los sectores donde domina la filita, la argilita o la presencia de rellenos blandos concentran el fracturamiento alto, la permeabilidad elevada y la mayor incidencia de inestabilidad, por lo que necesitan drenes, mallas y shotcrete reforzado, de modo que la respuesta global del túnel queda controlada por estas zonas críticas de macizo más fracturado y saturado.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO EN TÉRMINOS DE FRACTURAMIENTO, CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y GRADO DE SATURACIÓN

A.- Caracterización del macizo roco

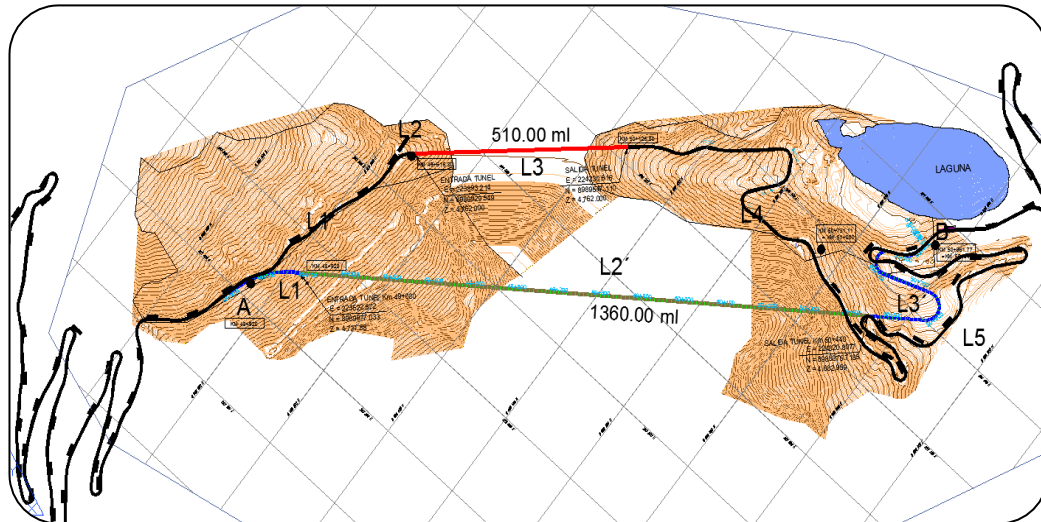
A.1.- Condiciones geológicas generales del túnel

El análisis geológico realizado sobre los 10 tramos seleccionados mediante observación estructurada y mapeo georreferenciado en ArcGIS Pro evidencia que el túnel atraviesa andesitas, granodioritas y niveles filíticos que varían a lo largo del eje, estas unidades presentan comportamientos distintos frente a la fracturación y al

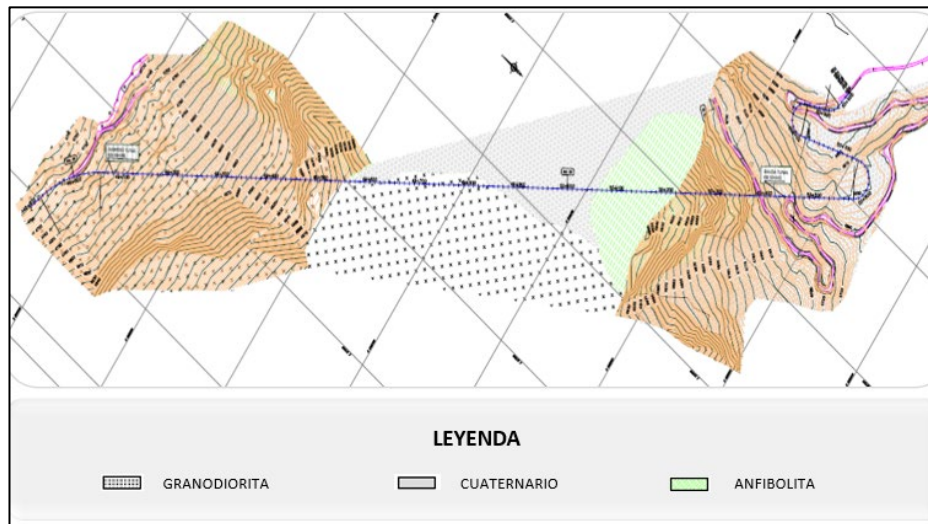
paso del agua, lo que explica la respuesta heterogénea observada en los ensayos y registros de campo.

Figura 12

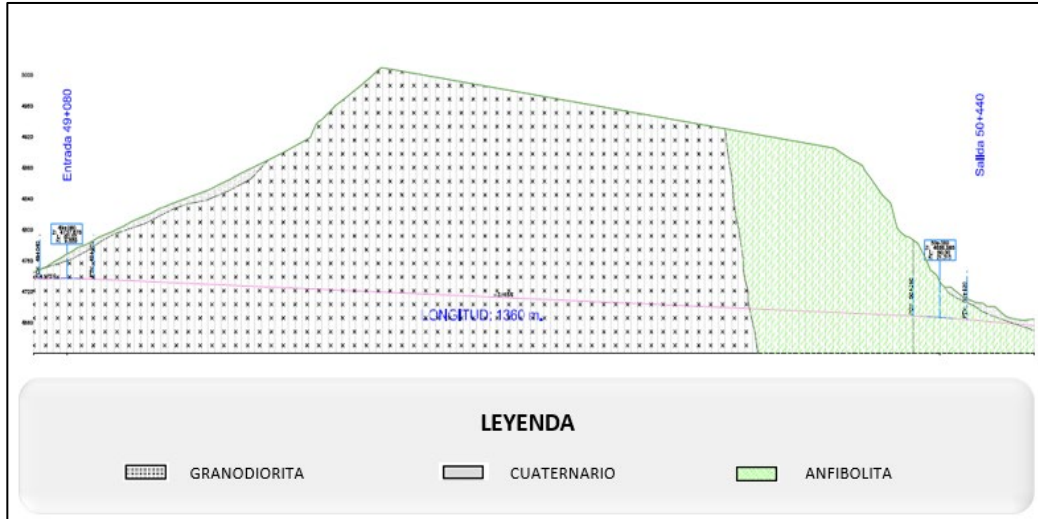
Perfil longitudinal del túnel



En la figura 12, se muestra cómo la variación del relieve condiciona el comportamiento hidráulico del macizo, ya que los tramos con pendiente suave favorecen la acumulación de humedad y coinciden con las zonas donde se registraron filtraciones durante la excavación, mientras que los sectores con mayor desnivel permiten una descarga más rápida del agua a través de fracturas abiertas. La presencia de la laguna en el extremo oriental añade una carga hidráulica que incrementa la permeabilidad efectiva en ese sector, por lo que la figura ayuda a entender por qué ciertos tramos del túnel presentan mayor saturación y requieren medidas de control más estrictas.

Figura 13*Plano en planta geológico*

En la figura 13, permite reconocer la distribución lateral de las unidades litológicas que atraviesa el eje del túnel, donde la granodiorita domina la mayor parte del trazado y aporta un comportamiento competente con baja permeabilidad, mientras que los sectores asociados a depósitos cuaternarios y zonas de anfibolita generan variaciones locales en la calidad del macizo. Estas transiciones litológicas influyen en la respuesta hidráulica durante la excavación, porque los materiales sueltos del cuaternario y las zonas metamórficas con fracturación más abierta favorecen el ingreso de agua, de modo que la figura ayuda a identificar los tramos donde se espera mayor heterogeneidad geotécnica y posibles incrementos de saturación.

Figura 14*Perfil longitudinal geológico*

En la figura 14 muestra cómo el trazado del túnel avanza a través de un macizo dominado por granodiorita, lo cual aporta un comportamiento competente y baja permeabilidad en la mayor parte del recorrido, aunque se observa un tramo de anfibolita hacia el sector de salida que introduce una zona de litología diferente y potencialmente más fracturada. Este cambio litológico puede generar variaciones locales en la respuesta hidrogeotécnica, ya que la anfibolita presenta mayor heterogeneidad estructural y favorece la aparición de filtraciones puntuales. El gráfico también evidencia los depósitos cuaternarios ubicados en superficie, los cuales no interfieren directamente con la excavación, pero sí explican parte del drenaje natural del terreno hacia las zonas de contacto litológico.

Tabla 9*Unidades geológicas identificadas*

Tramo	Progresiva (Km+)	Litología dominante	Rasgo estructural principal	Comportamiento geomecánico
T1	49+080 – 49+180	Andesita	Fracturas moderadas	Bueno
T2	49+180 – 49+280	Andesita – Filita	Meteorización superficial	Regular
T3	49+280 – 49+380	Granodiorita	Estructura homogénea	Bueno
T4	49+380 – 49+480	Filita	Fracturación alta	Regular – Malo
T5	49+480 – 49+580	Andesita	Discontinuidades aisladas	Bueno
T6	49+580 – 49+680	Granodiorita	Bloques compactos	Bueno
T7	49+680 – 49+780	Filita – Argilita	Humedad localizada	Regular
T8	49+780 – 49+880	Andesita	Fracturas dispersas	Bueno
T9	49+880 – 49+980	Andesita – Filita	Rellenos blandos	Regular
T10	49+980 – 50+080	Granodiorita	Estructura estable	Bueno

En la tabla 9, el comportamiento geomecánico del túnel se mantiene mayormente favorable en los tramos excavados en andesita y granodiorita, donde la estructura es homogénea y las fracturas son limitadas, mientras que las zonas con presencia de filita muestran fracturación alta, humedad o rellenos blandos, lo que

reduce la calidad del macizo y explica los tramos con respuesta regular o tendiente a mala.

B.- Caracterización del fracturamiento

Los parámetros estructurales obtenidos mediante observación directa y análisis con Dips muestran variaciones claras entre tramos, ya que la fracturación aumenta en unidades filíticas y disminuye en rocas intrusivas más competentes.

B.1.- Densidad de fracturas

La densidad de discontinuidades crece en los tramos T4 y T7, donde la roca se encuentra más meteorizada, mientras que en T3, T6 y T10 la fracturación es baja debido a la naturaleza masiva de la granodiorita.

Tabla 10

Densidad de fracturas

Tramo	Progresiva (Km+)	Fracturas por metro	Clase del macizo (RMR)	Comentario
T1	49+080 – 49+180	4–6	Buena	Fracturas moderadas
T2	49+180 – 49+280	6–9	Regular	Influencia filítica
T3	49+280 – 49+380	2–4	Buena	Bloques compactos
T4	49+380 – 49+480	>10	Mala	Tramo alterado
T5	49+480 – 49+580	3–5	Buena	Discontinuidad baja
T6	49+580 – 49+680	2–3	Buena	Roca homogénea
T7	49+680 – 49+780	8–11	Regular – Mala	Fracturación alta

T8	49+780 – 49+880	3–6	Buena	Estructura estable
T9	49+880 – 49+980	6–8	Regular	Rellenos blandos
T10	49+980 – 50+080	2–4	Buena	Mejor cohesión

La tabla 10 muestra que la mayoría de tramos del túnel se ubican en una clase de macizo buena según RMR, con entre dos y seis fracturas por metro y comentarios que describen bloques compactos, roca homogénea o estructuras estables, en cambio los sectores T4, T7 y T9 concentran los valores más altos de fracturas por metro y descienden a clases regular o mala, lo que refleja una mayor alteración del macizo, presencia de rellenos blandos e influencia filítica, de modo que estos tramos se reconocen como los segmentos estructuralmente más débiles y condicionan el comportamiento global de la excavación

B.2.- Orientación de fracturas

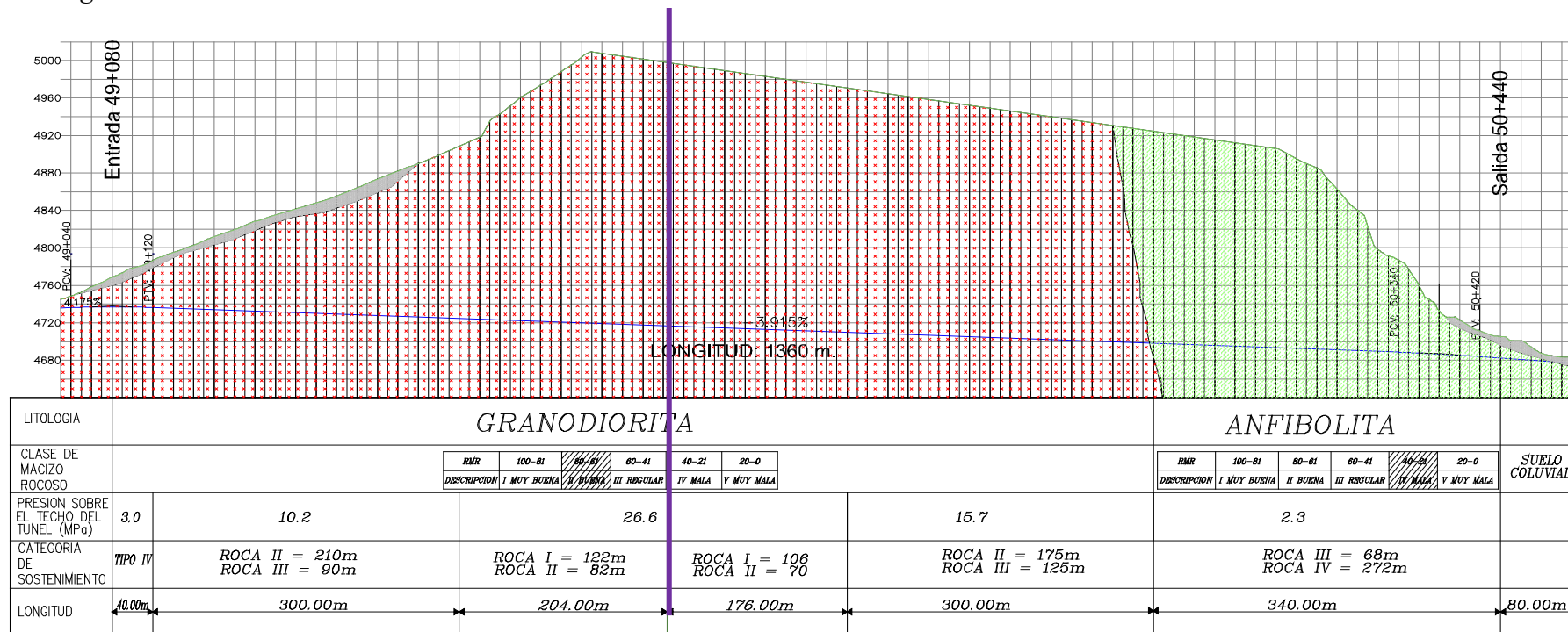
El análisis en Dips revela dos familias principales de discontinuidades, una con buzamientos altos y dirección transversal al eje del túnel, y otra con buzamientos intermedios que acompaña la dirección de avance, esta configuración explica cambios de estabilidad en T2, T4 y T7 donde la orientación se vuelve menos favorable.

B.3.- Condiciones geotécnicas asociadas

Las discontinuidades muestran aperturas delgadas y rugosidad moderada en la mayor parte del trazado, sin embargo, los tramos T4 y T7 presentan planos más lisos y rellenos arcillosos que reducen la trabazón, lo que coincide con los eventos de humedad y menor calidad estructural descritos en campo.

Figura 15

Plano geotécnico



$$40\%Lt = 544m \quad \left\{ \begin{array}{ll} ROCA I = 122m & 22\% \\ ROCA II = 292m & 54\% \\ ROCA III = 90m & 17\% \\ ROCA IV = 40m & 7\% \end{array} \right.$$

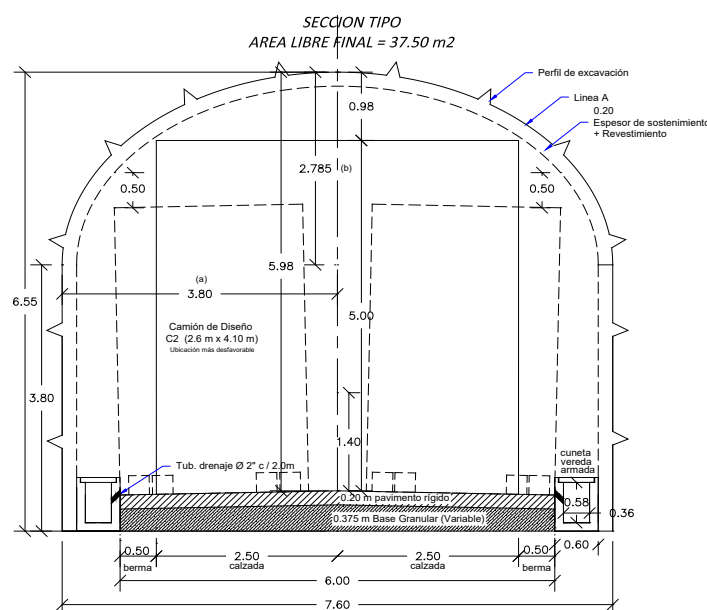
$$60\%Lt = 816m \quad \left\{ \begin{array}{ll} ROCA I = 106m & 13\% \\ ROCA II = 245m & 30\% \\ ROCA III = 193m & 24\% \\ ROCA IV = 272m & 33\% \end{array} \right.$$

En la figura 15, se muestra dos dominios litológicos que se diferencian con claridad a lo largo del eje del túnel, ya que la granodiorita ubicada en el sector izquierdo aparece como una masa continua y compacta que expresa un macizo de buena calidad, con fracturas limitadas y un comportamiento estable que se mantiene de manera uniforme en la mayor parte de su extensión, mientras que hacia la derecha se observa el ingreso progresivo de la anfibolita, cuya textura más heterogénea y la pendiente superior más pronunciada sugieren condiciones geológicas menos favorables y una respuesta estructural más variable frente a la excavación.

Al acercarse a la zona donde ambas litologías se encuentran, se advierte un cambio en el comportamiento geomecánico, debido a que la anfibolita muestra mayor influencia de humedad y una fracturación que tiende a intensificarse, lo que coincide con la necesidad de aplicar sostenimientos más robustos y un control hidráulico más cuidadoso, de modo que el perfil permite reconocer los tramos más competentes y aquellos que requieren medidas adicionales para asegurar la estabilidad global del túnel.

Figura 16

Corte transversal típico del Túnel Punta Olímpica



La figura 16, evidencia la configuración estructural adoptada para la excavación del túnel, donde la bóveda curva distribuye de manera uniforme los esfuerzos y favorece la estabilidad global, ya que la geometría semicircular reduce concentraciones de tensión y permite que el macizo trabaje de forma más homogénea, mientras que la sección libre de más de siete metros cuadrados garantiza un espacio suficiente para tránsito, ventilación y operatividad durante la fase constructiva. Las dimensiones del revestimiento y del sostenimiento se muestran equilibradas, con espesores diferenciados en la parte superior y en los hastiales, lo que responde a la variación esperada de presiones y al comportamiento geomecánico observado en campo.

En la zona inferior se aprecia el cunetón para drenaje y la conducción de agua subterránea, lo cual es esencial con la presencia de filtraciones intermitentes a lo largo de la traza, ya que permite evacuar el flujo y evitar acumulaciones que comprometan la durabilidad del revestimiento, de modo que el conjunto del corte muestra una solución estructural que integra estabilidad, manejo hidráulico y funcionalidad operativa, manteniendo una proporción que facilita tanto la excavación como la futura operación del túnel.

C.- Conductividad hidráulica del macizo

Los resultados se interpretan desde los registros de ensayos Lugeon y observaciones directas, los caudales se mantienen bajos excepto en los tramos donde la fracturación aumenta, lo que confirma la relación entre permeabilidad y estructura del macizo.

C.1.- Resultados de ensayos Lugeon

Tabla 11

Ensayo Lugeon

Tramo	Progresiva (Km+)	Evidencia hidráulica	Clase de permeabilidad	Comentario
--------------	-----------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	-------------------

T1	49+080 – 49+180	Humedad baja	Muy baja	Andesita compacta
T2	49+180 – 49+280	Goteo leve	Baja	Control estructural
T3	49+280 – 49+380	Sin filtración	Muy baja	Buen confinamiento
T4	49+380 – 49+480	Afloramientos pequeños	Media	Zona fracturada
T5	49+480 – 49+580	Humedad puntual	Baja	Fracturas aisladas
T6	49+580 – 49+680	Sin presencia hídrica	Muy baja	Granodiorita compacta
T7	49+680 – 49+780	Humedad continua	Media	Material alterado
T8	49+780 – 49+880	Goteo puntual	Baja	Rocas competentes
T9	49+880 – 49+980	Humedad moderada	Baja – Media	Rellenos blandos
T10	49+980 – 50+080	Sin filtración	Muy baja	Macizo estable

La tabla 11 muestra que la mayor parte del túnel se desarrolla en condiciones de permeabilidad muy baja a baja, ya que en los tramos T1, T3, T6, T8 y T10 la evidencia hidráulica se limita a humedad escasa, goteos puntuales o incluso ausencia total de filtraciones, situación coherente con la presencia de andesitas y granodioritas compactas que conforman un macizo estable y bien confinado, en cambio los tramos T4, T7 y T9 concentran el comportamiento más desfavorable, porque allí se observan afloramientos pequeños, humedad continua y niveles de humedad moderada que se clasifican como permeabilidad media o baja–media y se asocian a zonas fracturadas, material alterado y rellenos blandos, de modo que estos

sectores se reconocen como los puntos donde el control hidráulico requiere mayor atención durante la excavación y el sostenimiento.

C.2.- Caudal de infiltración observado

La infiltración disminuye conforme la excavación avanza, los mayores aportes de agua se registran en T4 y T7 donde coinciden fracturación intensa y cambios litológicos, mientras que los tramos granodioríticos mantienen caudales casi nulos.

Figura 17

Vista general del portal de salida del proyecto y presencia de glaciár colgante.



La figura 17 muestra que el portal de salida del túnel se apoya sobre afloramientos de granodiorita, lo que favorece una buena estabilidad por tratarse de una roca competente y con baja permeabilidad, sin embargo, el entorno presenta laderas empinadas con bloques sueltos que evidencian actividad gravitacional que debe ser controlada durante la obra, asimismo, se aprecia un glaciar colgante en las cotas superiores, cuyo deshielo puede incrementar la infiltración superficial, de

modo que el diseño final requiere medidas de drenaje y protección para asegurar la operación segura del portal.

C.3.-Interpretación hidrogeotécnica

La permeabilidad depende de la estructura del macizo y del grado de alteración, por lo que los tramos más fracturados y con rellenos arcillosos presentan mayor flujo, mientras que la roca intrusiva genera un sistema prácticamente impermeable, esta variación explica los cambios en estabilidad observados durante la excavación.

D.- Grado de saturación del macizo

D.1.- Contenido de humedad

Los niveles de humedad aumentan en filitas y argilitas debido a su mayor capacidad de retención, especialmente en T4 y T7, mientras que las andesitas y granodioritas muestran humedad reducida.

D.2.- Presión de poros

Las lecturas piezométricas no indican acumulación significativa de presión, la excavación actúa como dren natural y permite una disipación estable, aunque los tramos alterados mantienen respuestas más lentas.

Tabla 12

Presión de poros

Tramo	Progresiva (Km+)	Contenido de humedad (estimado)	Presión de poros (tendencia)	Observación
T1	49+080 – 49+180	Baja	Estable	Roca competente
T2	49+180 – 49+280	Moderada	Baja	Influencia de filitas

T3	49+280 – 49+380	Muy baja	Estable	Granodiorita compacta
T4	49+380 – 49+480	Alta	Media	Saturación por fracturas
T5	49+480 – 49+580	Baja	Estable	Buen drenaje natural
T6	49+580 – 49+680	Muy baja	Estable	Roca intrusiva
T7	49+680 – 49+780	Alta	Media	Material debilitado
T8	49+780 – 49+880	Baja	Estable	Fracturas dispersas
T9	49+880 – 49+980	Moderada	Media	Rellenos arcillosos
T10	49+980 – 50+080	Muy baja	Estable	Mejor cohesión

En la tabla 12 la distribución del contenido de humedad y la tendencia de presión de poros a lo largo del tramo evaluado muestra un macizo predominantemente estable, donde la granodiorita y la andesita mantienen valores bajos de humedad y presiones constantes, lo que revela un comportamiento competente con buena capacidad de drenaje, aunque los sectores con presencia de filitas y materiales alterados, como en los tramos T4 y T7, exhiben mayores niveles de humedad y una presión de poros en incremento que se asocia a fracturación intensa y saturación, lo cual reduce la calidad geomecánica y demanda atención en el control hidráulico, mientras que las zonas de rellenos como en T9 presentan humedad moderada y tendencia media de presión debido a su naturaleza arcillosa, afectando la rigidez del macizo e introduciendo variabilidad en la respuesta del terreno, de modo que el comportamiento general se mantiene favorable pero con

puntos críticos donde la presencia de agua influye directamente en la estabilidad local.

4.3 VARIACIONES EMPÍRICAS DE PERMEABILIDAD A LO LARGO DE LOS DISTINTOS TRAMOS DE EXCAVACIÓN

A. Distribución longitudinal de la permeabilidad en el túnel

La variación de la permeabilidad a lo largo del eje del túnel se manifiesta como un comportamiento irregular que responde a los cambios litológicos y al grado de fracturación del macizo, de modo que cada tramo refleja una relación distinta entre presencia de agua, rigidez del terreno y estabilidad, lo cual permite entender por qué ciertos sectores se mantienen secos mientras otros alcanzan niveles de humedad que comprometen el comportamiento geomecánico.

A.1 Comportamiento geomecánico según permeabilidad

La permeabilidad influye directamente en:

- Reducción de la cohesión entre bloques
- Incremento de humedad y pérdida de rigidez
- Aumento del riesgo de caídas de roca por debilitamiento de juntas
- Cambios en la presión de poros que afectan estabilidad local
- Necesidad de sostenimientos más robustos en sectores saturados

Tramos más sensibles: T4, T7, T9

Tramos estables: T1, T3, T6, T10

Tabla 13

Relación de permeabilidad-estabilidad

Tramo	Permeabilidad	Efecto en estabilidad	Comportamiento crítico
T1	Muy baja	Alta estabilidad	Ninguno
T2	Baja	Estabilidad buena	Humedad leve en juntas

T3	Muy baja	Muy estable	Roca competente
T4	Alta	Estabilidad reducida	Filtraciones y fracturación intensa
T5	Moderada	Estabilidad aceptable	Infiltración puntual
T6	Baja	Muy estable	Sin problemas hidráulicos
T7	Alta	Estabilidad comprometida	Saturación y pérdida de cohesión
T8	Moderada	Buena estabilidad	Humedad superficial controlada
T9	Moderada–Alta	Estabilidad variable	Rellenos arcillosos saturables
T10	Baja	Muy estable	Condición robusta

La tabla 15 evidencia que los tramos con permeabilidad muy baja, como T1, T3, T6 y T10, mantienen una estabilidad alta porque la roca es competente y no permite el paso del agua, lo que genera un comportamiento seguro sin manifestaciones críticas, mientras que los sectores donde la permeabilidad aumenta, como T4 y T7, muestran inestabilidad debido a filtraciones constantes, fracturación abierta y pérdida de cohesión. En los tramos intermedios, como T5, T8 y T9, la estabilidad se mantiene aceptable siempre que la humedad sea controlada, aunque la presencia de rellenos arcillosos en T9 introduce una respuesta más variable, de modo que la permeabilidad se consolida como el factor que explica la diferencia entre los tramos estables y los tramos críticos del túnel.

B. Relación entre permeabilidad y sostenimiento aplicado

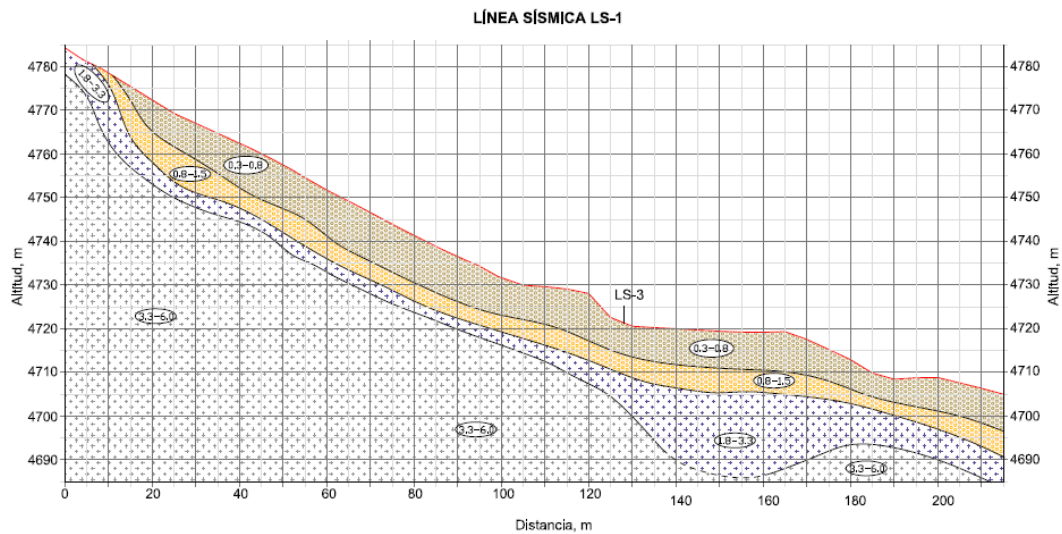
B.1 Tendencias de sostenimiento según nivel de agua

- Permeabilidad muy baja: shotcrete delgado o mínimo, pernos ocasionales.
- Permeabilidad baja: pernos sistemáticos, drenaje simple.
- Permeabilidad moderada: shotcrete + pernos + drenaje puntual.

- Permeabilidad alta: drenes profundos + malla + shotcrete reforzado + monitoreo.

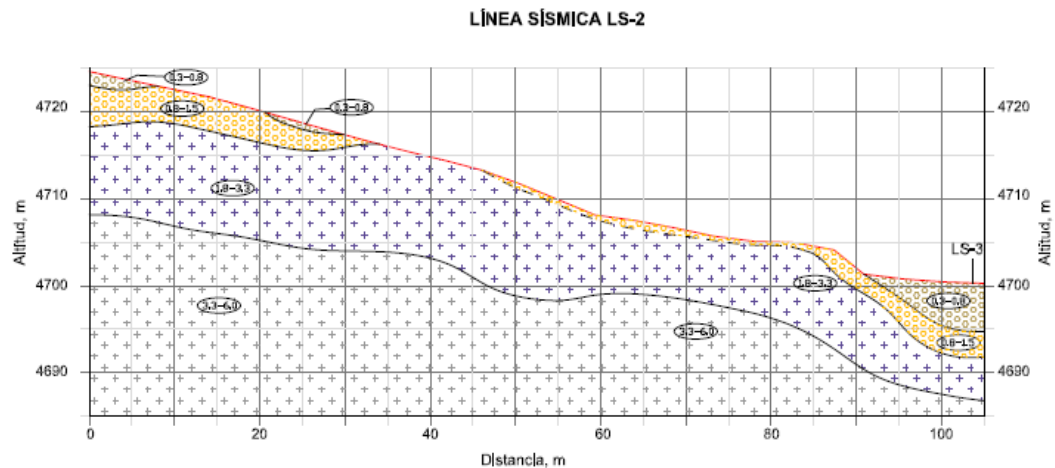
Figura 18

Sección geofísica - Línea sísmica LS-1



La figura 18 el perfil evidencia un nivel superficial de baja velocidad que indica material alterado con mayor humedad, luego aparece una franja intermedia asociada a zonas parcialmente fracturadas, mientras que el dominio inferior presenta velocidades altas y continuidad estructural que reflejan un macizo competente y de baja permeabilidad, de modo que las áreas donde la velocidad disminuye coinciden con tramos que requirieron sostenimiento más robusto porque la saturación y la pérdida de rigidez incrementan la demanda estructural del túnel.

B.2 Permeabilidad y tipos de sostenimiento empleado

Figura 19*Sección geofísica - Línea sísmica LS-2*

En la figura 19 la sección LS-2 representa un macizo con contrastes sísmicos que revelan variaciones en la calidad del terreno, ya que la zona superficial muestra velocidades bajas asociadas a materiales sueltos y con mayor humedad, mientras que la franja intermedia refleja velocidades moderadas que indican un macizo parcialmente fracturado con comportamiento variable, y en la base se observan velocidades altas que corresponden a roca compacta y competente, de modo que el perfil evidencia una mejora progresiva en la calidad del macizo con la profundidad y permite reconocer los sectores debilitados que requieren control adicional durante la excavación.

Tabla 14*Relación entre permeabilidad, estabilidad y sostenimiento*

Tramo	Permeabilidad	Estabilidad	Sostenimiento aplicado	Justificación
T1	Muy baja	Alta	Pernos shotcrete básico	+ Roca compacta sin aporte hídrico

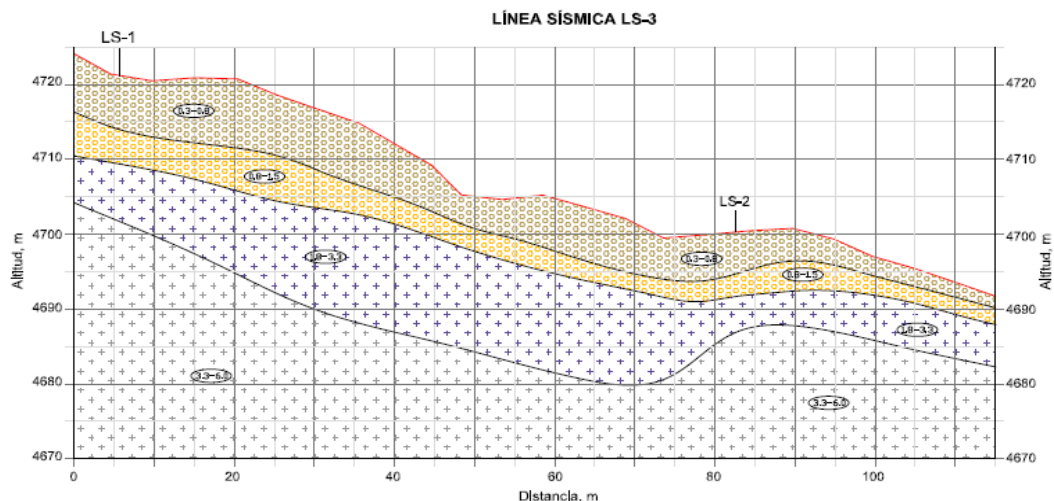
T2	Baja	Buena	Pernos ocasionales	Humedad leve en discontinuidades
T3	Muy baja	Muy estable	Shotcrete delgado	Comportamiento competente
T4	Alta	Reducida	Drenes shotcrete espeso + malla	+ Filtraciones y fracturación alta
T5	Moderada	Aceptable	Pernos sistemáticos	Infiltración puntual
T6	Baja	Muy estable	Sostenimiento mínimo	Granodiorita densa
T7	Alta	Comprometida	Shotcrete reforzado drenes	+ Saturación recurrente
T8	Moderada	Buena	Shotcrete pernos	+ Humedad controlada
T9	Moderada–Alta	Variable	Malla shotcrete doble	+ Rellenos arcillosos blandos
T10	Baja	Muy estable	Shotcrete estándar pernos	+ Buena cohesión final

La tabla 16 refleja que los tramos con permeabilidad baja o muy baja mantienen una estabilidad alta gracias a la compacidad del macizo, lo que permite usar sostenimientos simples como pernos y shotcrete delgado, en cambio los segmentos con permeabilidad alta pierden cohesión y muestran saturación o fracturación intensa, lo que reduce su estabilidad y exige drenes, mallas y shotcrete reforzado. De esta manera, el sostenimiento aplicado responde directamente al nivel

de agua presente y al estado estructural del macizo, generando esquemas mínimos en zonas competentes y refuerzos intensivos en los tramos críticos.

Figura 20

Sección geofísica - Línea sísmica LS-3



En la figura 20, la sección sísmica LS-3 muestra una estratigrafía continua donde los materiales superficiales más sueltos ocupan la parte alta del perfil, mientras que a mayor profundidad aparecen unidades más densas con velocidades superiores, lo que evidencia un macizo más competente. Se reconoce además un cambio gradual en las capas intermedias que indica variaciones locales en humedad y rigidez, de modo que la estructura general confirma un comportamiento estable con zonas puntuales donde la heterogeneidad del terreno podría influir en la respuesta geomecánica durante la excavación.

C. Roles críticos de los portales por influencia de agua

C.1 Portal de entrada (Km 49+080) – Condición hidrogeotécnica

- Ladera inestable con bloques sueltos
- Acumulación de humedad superficial
- Necesidad de falso túnel

- Malla hexagonal + anclajes + drenaje perimetral

C.2 Portal de salida (Km 50+440) – Influencia del glaciar colgante

- Mayor carga hidráulica por deshielo estacional
- Infiltración en discontinuidades externas
- Riesgo de caída de bloques por procesos gravitacionales
- Sostenimiento requerido: falso túnel, malla, shotcrete reforzado, drenes

D. Modelo conceptual de interacción agua–roca–sostenimiento

El comportamiento está dominado por:

- Litología: rocas intrusivas = baja permeabilidad; filitas = alta permeabilidad
- Estructura: fracturas actúan como canales preferenciales
- Hidráulica: infiltración variable condiciona esfuerzos y deformaciones
- Sostenimiento: aumenta conforme incrementa la permeabilidad

Esquema básico del modelo:

- Agua ingresa por discontinuidades
- Incrementa humedad y presión intersticial
- Reduce resistencia al corte del macizo
- Aumenta deformabilidad

Se requieren sistemas de soporte más rígidos y drenaje eficiente.

4.4 VARIACIONES GEOMECÁNICAS ASOCIADAS A LOS CAMBIOS DE PERMEABILIDAD EN LOS DIFERENTES TRAMOS DEL TÚNEL

A. Distribución de zonas críticas por permeabilidad y respuesta geomecánica

La caracterización de los tramos permitió reconocer sectores donde la permeabilidad genera respuestas mecánicas contrastantes, ya que los materiales con

mayor contenido de humedad mostraron pérdida de rigidez y disminución en la cohesión, mientras que las unidades más secas conservaron un comportamiento estable, lo que define una distribución longitudinal donde las zonas críticas se concentran en sectores de infiltración recurrente y presión de poros elevada.

B. Efectos de la permeabilidad en la estabilidad y deformabilidad del macizo

Los cambios de permeabilidad influyen en la estabilidad del macizo porque modifican el estado tensional interno, debido a que el incremento de humedad reduce la resistencia al corte y favorece la apertura de discontinuidades, de manera que los tramos con mayor saturación registran deformaciones más notorias y una respuesta mecánica sensible, mientras que los tramos de permeabilidad baja mantienen un comportamiento rígido y homogéneo.

Tabla 15

Variaciones geomecánicas asociadas a los cambios de permeabilidad en los tramos del túnel

Tramo	Permeabilidad	Respuesta geomecánica	Efecto en estabilidad	Implicancia para el sostenimiento
T1	Muy baja	Roca rígida y compacta	Alta estabilidad	Sostenimiento básico suficiente
T2	Baja	Humedad leve sin alterar rigidez	Estabilidad buena	Pernos ocasionales
T3	Muy baja	Comportamiento competente	Muy estable	Shotcrete delgado
T4	Alta	Fracturación e incremento de presión de poros	Estabilidad reducida	Drenes + shotcrete espeso + malla

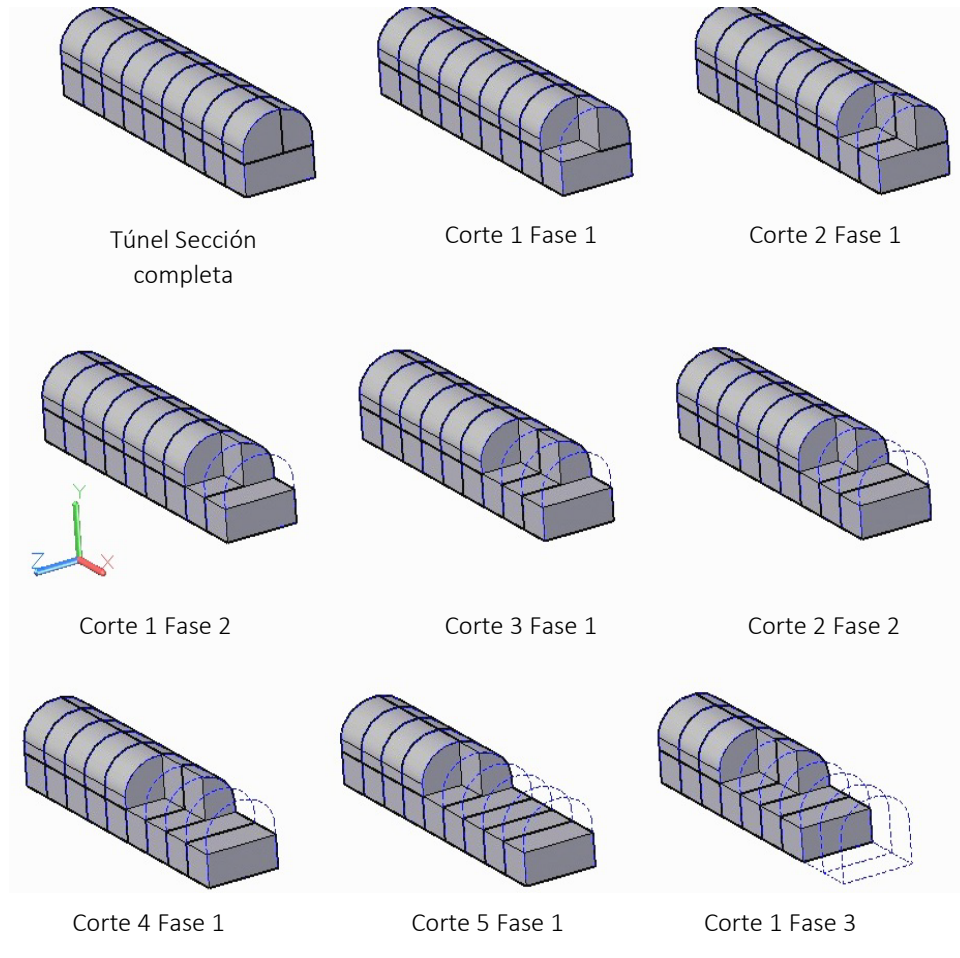
T5	Moderada	Infiltración puntual con pérdida ligera de cohesión	Estabilidad aceptable	Pernos sistemáticos	
T6	Baja	Granodiorita densa sin problemas hidráulicos	Muy estable	Sostenimiento mínimo	
T7	Alta	Saturación y debilitamiento de juntas	Estabilidad comprometida	Shotcrete reforzado drenes	+
T8	Moderada	Humedad superficial controlada	Buena estabilidad	Shotcrete pernos	+
T9	Moderada–Alta	Materiales arcillosos blandos y deformables	Estabilidad variable	Malla shotcrete doble	+
T10	Baja	Buena cohesión final con rigidez conservada	Muy estable	Shotcrete estándar pernos	+

C. Correlación entre permeabilidad, deterioro local y tipo de sostenimiento aplicado

La comparación entre permeabilidad y sostenimientos implementados revela que los sectores de alta permeabilidad requieren refuerzos más densos debido a la debilitación provocada por la infiltración, mientras que los sectores estables solo demandan sostenimientos básicos, lo que demuestra que la permeabilidad actúa como un condicionante directo del diseño de soporte, ya que determina la magnitud del deterioro local y el nivel de control hidráulico necesario.

Figura 21

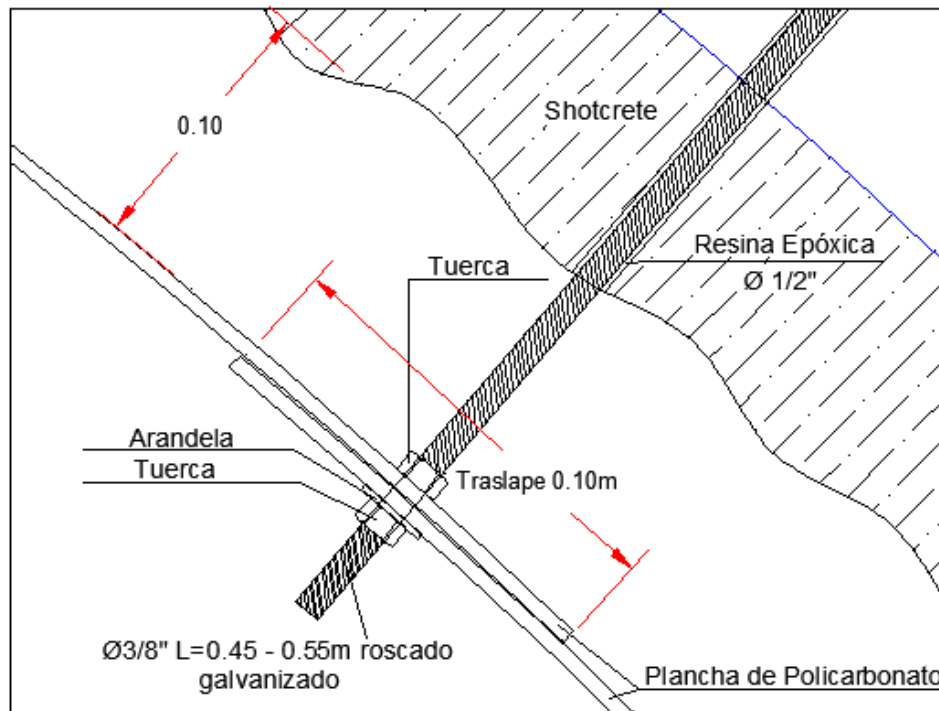
Secuencia de fases de excavación del túnel – Método convencional



En la figura 21 se expone la progresión constructiva del túnel mediante cortes que avanzan por etapas, se aprecia cómo el frente se divide en zonas que se excavan de forma alternada para mantener la estabilidad, las fases muestran un avance controlado donde primero se libera la parte superior, luego los laterales y finalmente la solera, de modo que la sección completa se conforma sin comprometer el comportamiento del macizo y permitiendo ajustar sostenimientos conforme varía la respuesta del terreno.

Figura 22

Detalle C del sistema de sostenimiento con perno, resina y shotcrete

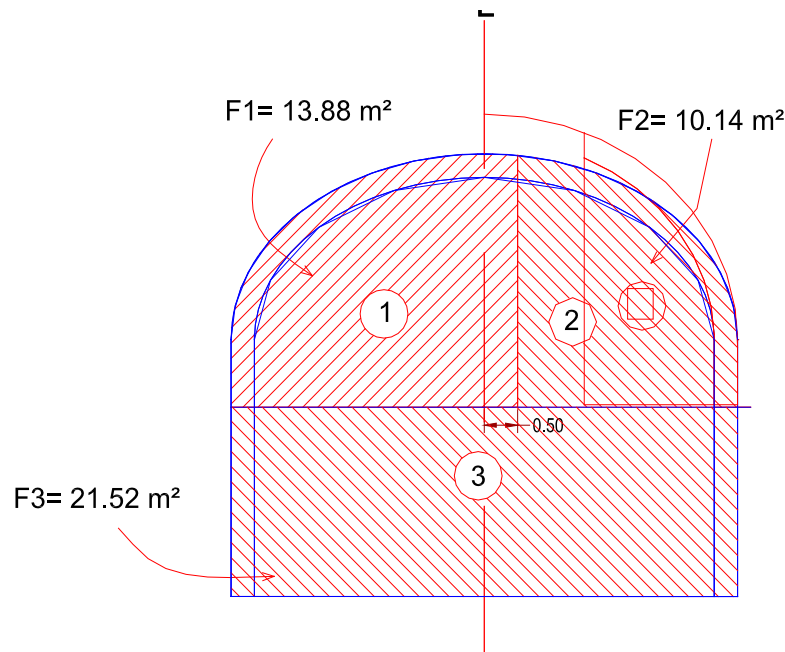


Detalle C
S/E

En la figura 22 se muestra la unión entre el perno anclado y el revestimiento primario, asimismo, el alojamiento del perno con resina epóxica dentro del macizo y el traslape que asegura la transferencia de esfuerzos, todo queda confinado por una capa de shotcrete que fija el conjunto y distribuye tensiones, mientras la arandela y la tuerca trabajan como apoyo superficial sobre la plancha de policarbonato para mantener la carga uniforme y evitar desplazamientos locales, así el detalle evidencia cómo se integra cada componente para garantizar un anclaje seguro en zonas donde la permeabilidad y la estabilidad requieren refuerzos puntuales.

Figura 23

Distribución interna de esfuerzos y respuesta del sostenimiento en la sección del túnel



La figura 23 muestra la sección del túnel con las zonas de mayor concentración de esfuerzo destacadas mediante sombreados, lo que permite reconocer cómo la carga del macizo se redistribuye hacia los hastiales y el arco superior mientras el sostenimiento capta los puntos donde el empuje es más intenso, así se identifican áreas que demandan mayor rigidez y sectores donde la estabilidad es más favorable, permitiendo ajustar el diseño del soporte sin exceder materiales ni comprometer la seguridad estructural.

Figura 24

Distribución del macizo rocoso alrededor de la sección excavada



En la figura 24 se muestra la sección del túnel rodeada por el macizo rocoso donde se evidencia la variación de tamaños y formas de los bloques que conforman la matriz externa y se aprecia cómo el contorno excavado queda sometido a una redistribución de tensiones que depende directamente de la fracturación presente, de modo que las zonas más compactas muestran un comportamiento más uniforme mientras que los sectores con bloques irregulares sugieren áreas susceptibles a deformaciones locales, todo esto ayuda a identificar los puntos donde el sostenimiento debe reforzarse para asegurar la estabilidad global de la sección.

Tabla 16

Correlación entre permeabilidad, deterioro local y tipo de sostenimiento aplicado

Permeabilidad	Deterioro local	Reacción del macizo	Sostenimiento requerido
---------------	-----------------	---------------------	-------------------------

Muy baja	Nulo o mínimo	Cohesión alta y juntas secas	Shotcrete delgado o pernos ocasionales
Baja	Humedad leve	Ligera pérdida de rigidez	Pernos sistemáticos
Moderada	Infiltración puntual	Reducción de cohesión y microfisuras	Shotcrete + pernos
Moderada–Alta	Humedad persistente en zonas blandas	Deformación irregular del contorno	Shotcrete doble + malla
Alta	Saturación y presión de poros elevada	Fracturación activa y debilitamiento de juntas	Drenes profundos + shotcrete reforzado + malla

En la tabla 16, la correlación evidencia que el deterioro del macizo aumenta en la misma proporción que la permeabilidad y esto obliga a evolucionar el sostenimiento desde soluciones simples en tramos secos hasta sistemas reforzados con drenes en sectores saturados, lo que confirma que la respuesta geomecánica depende directamente del nivel de agua presente en cada tramo.

Respecto al objetivo general: Analizar la caracterización y el análisis descriptivo de la permeabilidad del macizo rocoso en la excavación del Túnel Punta Olímpica, Áncash, 2025, los resultados integrados de las tablas y figuras muestran que el macizo se comporta de manera claramente heterogénea porque en los tramos T1, T3, T6 y T10, ubicados entre las progresivas 49+080 y 50+080 en andesitas y granodioritas compactas, la permeabilidad se clasifica como muy baja a baja, la estabilidad se mantiene alta o muy estable y el sostenimiento requerido se limita a pernos, shotcrete básico o incluso soluciones mínimas, mientras que en los tramos T4, T7 y T9 donde predominan filitas, argilitas y rellenos blandos, se registra fracturamiento alto con más de ocho a diez fracturas por metro, permeabilidad media o moderada–alta, contenidos de humedad elevados y tendencia de presión de poros media, lo que genera estabilidad reducida o comprometida y obliga a emplear drenes, shotcrete espeso, mallas y refuerzos adicionales, de modo que el

comportamiento hidráulico y geomecánico del túnel está controlado por la combinación entre litología, estructura y saturación, situación que coincide con lo planteado por Machado et al. (2025) cuando señalan que la variación de caudales infiltrados en túneles se explica principalmente por la heterogeneidad estructural del macizo y por la interconectividad de las discontinuidades, y se relaciona también con lo descrito por Xin et al. (2024) al indicar que las zonas de falla y fracturas activas concentran los mayores ingresos de agua, por lo que la caracterización descriptiva realizada en Punta Olímpica se alinea con estas evidencias y se ajusta a los criterios de evaluación hidrogeotécnica recomendados en el Manual de Carreteras del MTC y en el Reglamento Nacional de Edificaciones para obras subterráneas en roca.

En relación con el objetivo específico 1: Determinar la caracterización del macizo en términos de fracturamiento, conductividad hidráulica y grado de saturación, la información resumida en las tablas 9, 10, 11 y 12 evidencia que los tramos desarrollados en granodiorita y andesita, como T1, T3, T5, T6, T8 y T10, presentan estructuras homogéneas, bloques compactos y entre dos y seis fracturas por metro, lo que se traduce en clases de macizo buenas según RMR, evidencias hidráulicas limitadas a humedad baja, ausencia de filtraciones o goteos puntuales clasificados como permeabilidad muy baja o baja, contenidos de humedad reducidos y presiones de poros estables, mientras que en los tramos T4, T7 y T9 se observa una fracturación alta con más de ocho a diez discontinuidades por metro, presencia de rellenos blandos y material alterado, humedad alta o moderada y permeabilidad media o baja–media que se asocia a saturación por fracturas y rellenos arcillosos, de modo que el macizo alterna sectores rígidos y secos con zonas debilitadas por el agua, lo cual coincide con lo descrito por Cantos y Pinargote (2021) cuando señalan que en túneles de transporte las zonas de mayor fracturamiento presentan permeabilidades superiores a las previstas por diseño y se convierten en focos de inestabilidad si no se integran adecuadamente al análisis geomecánico, y esta lectura se encuentra en armonía con las recomendaciones de la ISRM y de la norma ASTM D6032-17 que insisten en vincular los ensayos de

permeabilidad in situ con la clasificación estructural del macizo para obtener una caracterización coherente del comportamiento hidrogeotécnico.

En cuanto al objetivo específico 2: Identificar las variaciones empíricas de permeabilidad a lo largo de los distintos tramos de excavación, los resultados muestran que la permeabilidad no se distribuye de forma uniforme a lo largo del eje del túnel sino que sigue un patrón longitudinal donde los tramos iniciales y finales, dominados por granodioritas compactas como T1, T3, T6 y T10, mantienen condiciones de muy baja a baja permeabilidad y estabilidad alta, mientras que la porción central, asociada a filitas, argilitas y contactos litológicos, concentra los valores más desfavorables, ya que en T4, T7 y T9 se registran humedades altas o moderadas, evidencias de humedad continua, afloramientos pequeños y rellenos blandos, junto con permeabilidades media o moderada-alta y presiones de poros en tendencia media, lo que configura una franja intermedia de mayor riesgo hidráulico, a ello se suma que la figura 12 muestra cómo la variación del relieve y la presencia de una laguna en el extremo oriental incrementan la carga hidráulica hacia determinados sectores, y que las secciones sísmicas de las líneas LS-1, LS-2 y LS-3 reflejan contrastes de velocidad compatibles con materiales más saturados en niveles superficiales y mejor confinados en profundidad, por lo que la variación empírica de permeabilidad responde tanto a la estructura interna del macizo como a las condiciones hidrológicas del entorno, en concordancia con lo reportado por Wang et al. (2022) quienes encontraron que en túneles excavados en zonas de falla la permeabilidad del macizo aumenta gradualmente durante la excavación al activarse las fracturas, y también con lo propuesto por Ma et al. (2023) al demostrar que la migración de partículas finas en fracturas saturadas modifica la porosidad y la conductividad hidráulica en el tiempo, lo que refuerza la necesidad de interpretar las variaciones de permeabilidad de Punta Olímpica como parte de un sistema dinámico más que como un parámetro estrictamente estático.

Finalmente, respecto al objetivo específico 3: Evaluar la influencia de la permeabilidad en la estabilidad y el sostenimiento aplicado en la excavación del túnel, la comparación entre las tablas 13, 14, 15 y 16 permite confirmar que existe

una correlación directa entre el nivel de permeabilidad, la respuesta geomecánica y el tipo de soporte instalado, porque en los tramos donde la permeabilidad es muy baja o baja, como T1, T3, T6 y T10, el macizo se comporta como roca rígida y compacta con juntas secas o con humedad leve, la estabilidad se clasifica como buena o muy estable y el deterioro local es mínimo, de modo que basta con shotcrete delgado, pernos ocasionales o sostenimiento mínimo, mientras que en los tramos con permeabilidad alta o moderada–alta, como T4, T7 y T9, la saturación incrementa la presión de poros, debilita las juntas, favorece la fracturación activa y genera deformaciones irregulares en el contorno, lo que reduce la estabilidad a niveles aceptables, reducidos o comprometidos y exige sistemas de soporte densos con drenes profundos, shotcrete reforzado o doble, mallas y anclajes sistemáticos, patrón que se ve reforzado por lo descrito en las figuras de detalle del sostenimiento donde se aprecia el rol de los pernos, la resina y el shotcrete en la transferencia de esfuerzos, esta lectura coincide con lo planteado por Osorio y Machaca (2023) al señalar que la permeabilidad y la presencia de humedad modifican la forma en que el macizo transmite carga hacia los pernos y revestimientos y deben incorporarse explícitamente al diseño de sostenimientos subterráneos, y se articula también con lo señalado por Gutiérrez Mendivil (2022) quien sostiene que el análisis geomecánico detallado es crítico para la seguridad operativa en túneles mineros, reforzando lo dispuesto por el Decreto Supremo 024-2016-EM y por las recomendaciones de la ISRM en cuanto a que el diseño de drenaje y soporte debe ajustarse a las condiciones hidrogeológicas reales del macizo, tal como se ha demostrado en el caso del Túnel Punta Olímpica.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. Respecto al objetivo general, se concluye que la caracterización y el análisis descriptivo de la permeabilidad del macizo rocoso en el Túnel Punta Olímpica evidencian un comportamiento heterogéneo donde predominan tramos con permeabilidad muy baja a baja en andesitas y granodioritas estables, pero se concentran condiciones críticas en T4, T7 y T9 por filitas y rellenos saturables, de modo que la permeabilidad se confirma como un factor determinante para explicar la estabilidad y el tipo de sostenimiento aplicado en toda la excavación.
2. En relación con el objetivo específico a), se concluye que el macizo presenta en su mayoría una calidad geomecánica buena debido a estructuras homogéneas y fracturamiento moderado en rocas intrusivas con baja saturación, mientras que las zonas filíticas y argilíticas muestran fracturación alta, mayor contenido de humedad y permeabilidad media o baja-media, lo que configura sectores localmente debilitados que condicionan la respuesta general del túnel.
3. Respecto al objetivo específico b), se concluye que las variaciones empíricas de permeabilidad a lo largo de los tramos no siguen un patrón uniforme sino que se organizan en una franja central más permeable donde se concentran las filtraciones y la saturación, mientras que los tramos iniciales y finales mantienen condiciones secas o ligeramente húmedas, de modo que la combinación de cambios litológicos, densidad de fracturas y relieve explica la distribución desigual del flujo dentro del túnel.
4. Finalmente, en cuanto al objetivo específico c), se concluye que la influencia de la permeabilidad sobre la estabilidad y el sostenimiento es directa, ya que en los tramos secos o de permeabilidad baja bastan esquemas básicos con pernos y shotcrete delgado, mientras que en los sectores de

permeabilidad alta o moderada–alta se requiere drenes, mallas y shotcrete reforzado para compensar la pérdida de cohesión y el aumento de presión de poros, confirmando que el diseño de soporte debe adaptarse al nivel de agua presente en cada tramo.

Recomendaciones:

1. Las autoridades encargadas de la supervisión de obras subterráneas deberían reforzar los procedimientos de evaluación hidrogeológica en túneles, incorporando controles más estrictos de permeabilidad en campo, porque los tramos T4, T7 y T9 mostraron saturación y fracturamiento que podrían generar inestabilidad si no se detectan a tiempo, de modo que un monitoreo más cercano permitiría actuar antes de que estos sectores evolucionen.
2. Conviene que el Reglamento Nacional de Edificaciones y el Manual de Carreteras actualicen sus lineamientos para obras en macizos heterogéneos, señalando la necesidad de ejecutar ensayos hidráulicos en intervalos más cortos durante la excavación, ya que la investigación evidenció cambios bruscos de permeabilidad dentro de distancias reducidas, y un control más frecuente ayudaría a definir con mayor precisión el tipo de sostenimiento y los drenajes que realmente requiere cada tramo.
3. El cumplimiento del DS 024-2016-EM debería fortalecerse mediante la instalación de instrumentos de lectura continua en túneles de alta montaña, porque la presión de poros tiende a variar en zonas permeables y un registro permanente permitiría identificar incrementos que puedan anticipar fallas, lo cual resulta especialmente relevante en sectores alterados o con altos niveles de humedad como los observados en este estudio.
4. Sería conveniente que las entidades ejecutoras y los gobiernos regionales impulsen programas de capacitación para brigadas geotécnicas, con énfasis en reconocimiento rápido de zonas fracturadas, identificación de filtraciones

y selección oportuna del sostenimiento, ya que la variabilidad del macizo del túnel Punta Olímpica demuestra que las decisiones que se toman directamente en campo influyen en la seguridad y en el costo final de la obra.

5. Finalmente, los proyectos que se desarrollen en la Cordillera Blanca deberían integrar modelos hidrogeológicos predictivos compatibles con estándares internacionales como ASTM e ISRM, porque, si bien la caracterización realizada fue suficiente para describir el comportamiento del macizo, la incorporación de simulaciones tridimensionales del flujo subterráneo permitiría prever escenarios de ingreso de agua y optimizar el diseño de sostenimiento desde la etapa de planificación.

REFERENCIAS

- Asociación Nacional de Ingeniería de Túneles. (2021). *Manual de túneles: diseño, construcción, operación y mantenimiento*. ANRACI. <https://anraci.org/wp-content/uploads/2021/12/Manual-de-Tuneles-Publ.pdf>
- Bazán Cruzado, M. (2023). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso en el portal de entrada de un túnel en proyección*. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/29345>
- Cantos Salazar, D. y Pinargote, E. (2021). Análisis empírico de la permeabilidad del macizo rocoso: aplicación en un túnel. In *Escuela Superior Politécnica del Litoral*. <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53987>
- Fu, X., Wu, M., Tiong, R. L. K. y Zhang, L. (2024). Data-driven joint multi-objective prediction and optimization for advanced control during tunnel construction. *Expert Systems with Applications*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122118>
- Ghasvareh, M. A., Shahabi, M. A., Shahid, M. R. y Panjeh, M. G. (2024). Investigating the geomechanical properties and permeability of the rocks of the Kurit dam site using geostatistical methods. *Soils and Rocks*, 47(1). <https://doi.org/10.28927/SR.2024.014622>
- Gutiérrez Mendívil, A. (2022). *Evaluación geomecánica del macizo rocoso en operaciones subterráneas mineras del Perú*. <https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/12246>
- He, C., Cai, Y., Pu, C., Zhou, S., Di, H. y Zhang, X. (2024). Deformation analysis and protection measures of existing metro tunnels effected by

- river channel excavation in soft soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105504>
- Herrera Irigoín, E. (2021). *Evaluación geomecánica para el diseño del sostenimiento del túnel de exploración Chaquicocha Fase II – Minera Yanacocha* SRL. https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4150/TESIS%20PROFESIONAL_%20Edilberto%20Herrera%20Irigo%C3%A9n.pdf?sequence=4
- Hu, J., He, M., Li, H., Tao, Z., Liu, D., Cheng, T. y Peng, D. (2024). Rockburst Hazard Control Using the Excavation Compensation Method (ECM): A Case Study in the Qinling Water Conveyance Tunnel. *Engineering*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.11.013>
- Lee, M., Lee, J. Y. y Jang, J. (2024). Numerical modeling of groundwater system with tunnel construction in an urban area of Korea: implications for land subsidence and mitigation measures. *Environmental Earth Sciences*, 83(2). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11211-8>
- Liang, C., Zhu, J., Zhang, J., Zhu, Q., Lu, J., Lai, J. y Wu, J. (2024). A Knowledge-Guided Intelligent Analysis Method of Geographic Digital Twin Models: A Case Study on the Diagnosis of Geometric Deformation in Tunnel Excavation Profiles. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi13030078>
- Ma, J., Zhao, L. y Cheng, Y. (2023). Two-phase water–rock migration mechanism and permeability evolution in faulted tunnels under high hydraulic gradient. *Journal of Mining Science and Technology*, 33(6), 612. <https://doi.org/10.1007/s40789-023-00612-6>
- Machado, A., Santos, V. y Ribeiro, L. (2025). Assessment of rock mass permeability and infiltration potential in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779825006182>

- Manterola, C., Hernández-Leal, M. J., Otzen, T., Espinosa, M. E. y Grande, L. (2023). Estudios de Corte Transversal. Un Diseño de Investigación a Considerar en Ciencias Morfológicas. *International Journal of Morphology*, 41(1). <https://doi.org/10.4067/s0717-95022023000100146>
- Mendoza Mogollón, L. (2024). Caracterización geomecánica del macizo rocoso para el control de estabilidad en la Unidad Minera Cobriza. In *Universidad Continental*. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15460/1/IV_FIN_110_TE_Mendoza_Cueva_2024.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2025). *Estadística de infraestructura de transportes: infraestructura vial*. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/344790-estadistica-infraestructura-de-transportes-infraestructura-vial>
- Ministerio de Transportes y comunicaciones. (2025). *Estadística infraestructura de transportes: Infraestructura vial*. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/344790-estadistica-infraestructura-de-transportes-infraestructura-vial>
- Osorio, J. y Machaca, N. (2023). Diseño de sostenimiento subterráneo considerando la permeabilidad del macizo rocoso en excavaciones mineras. In *Universidad Tecnológica del Perú*. https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/7534/J.Osorio_N.Machaca_Tesis_Titulo_Profesional_2023.pdf
- Pengshuai, W., Zhengzheng, C., Zhenhua, L., Feng, D., Wenqiang, W., Minglei, Z. y Zijie, H. (2024). Experimental research on mechanical

- performance of grouting plugging material with large amount of fly ash. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53623-x>
- Pozo Puértolas, R. (2024). Investigación aplicada en diseño. *Grafica*, 12(23). <https://doi.org/10.5565/rev/grafica.282>
- Qiao, L., Liu, J. y Wang, Z. (2024). Determining representative permeability coefficients of original and grouted rock mass for underground water-sealed oil storage: method and application. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(4). <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03593-1>
- Shu, B. y Zeng, F. (2024). Effect of block caving mining disturbance on the permeability characteristics evolution of fractured rock mass. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(3). <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03577-1>
- Song, Z., Wang, L. y Liu, H. (2024). Estimation of rock mass permeability using relaxation time and P-wave velocity. *Tunnelling and Underground Space Technology*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926985125001715>
- Wang, C., Liang, R., Wu, J., Li, Z., Ding, Z. y Wu, W. (2024). Performances of Shield-Driven Tunnels Subjected to Excavation of a Large-Scale Basement in Soft Soils. *International Journal of Geomechanics*, 24(3). <https://doi.org/10.1061/ijgnai.gmeng-8228>
- Wang, X, Zhang, Y. y Liu, H. (2022). Mechanisms of water evolution and permeability in fractured rock tunnels intersecting fault zones. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8(4), 2327. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2082327>

- Wang, Xiaohong, Zheng, J., Sun, H., Lü, Q., Ge, Q. y Tan, S. (2024). A semi-theoretical method for determining the permeability tensor of fractured rock masses in three-dimensional space. *Physics of Fluids*, 36(2). <https://doi.org/10.1063/5.0195695>
- Wang, Z., Shi, C., Chen, H. y Lei, M. (2024). Probabilistic evaluation for excavation-induced longitudinal responses of existing shield tunnel in spatially random soils. *Computers and Geotechnics*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106110>
- Xin, J., Wang, Y. y Zhang, X. (2024). Study on water inrush characteristics of hard rock tunnel based on spatiotemporal evolution. *Applied Sciences*. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/6/2536>
- Zhengzheng, C., Pengshuai, W., Zhenhua, L. y Feng, D. (2024). Migration mechanism of grouting slurry and permeability reduction in mining fractured rock mass. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51557-y>

APÉNDICE

Matriz de consistencia del informe final de tesis

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES/DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA	RECOMENDACIONES
1. INTERROGANTE PRINCIPAL ¿De qué manera la caracterización y el análisis descriptivo de la permeabilidad del macizo rocoso se relacionan con la excavación del Túnel Punta Olímpica, Áncash, 2025? 2. INTERROGANTES ESPECÍFICAS a) ¿Cómo se caracteriza el macizo en términos de fracturamiento, conductividad hidráulica y grado de saturación en la excavación del Túnel Punta Olímpica, Áncash, 2025? b) ¿Qué variaciones empíricas de permeabilidad se presentan a lo largo de los distintos tramos de la excavación del túnel? c) ¿Qué influencia tiene la permeabilidad observada en la estabilidad y en el tipo de sostenimiento aplicado durante la excavación?	1. OBJETIVO GENERAL Analizar la caracterización y el análisis descriptivo de la permeabilidad del macizo rocoso en la excavación del Túnel Punta Olímpica, Áncash, 2025. 2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS a) Determinar la caracterización del macizo en términos de fracturamiento, conductividad hidráulica y grado de saturación. b) Identificar las variaciones empíricas de permeabilidad a lo largo de los distintos tramos de la excavación. c) Evaluar la influencia de la permeabilidad en la estabilidad y el sostenimiento aplicado en la excavación del túnel.	1. HIPÓTESIS GENERAL (H1): La caracterización y el análisis descriptivo de la permeabilidad del macizo rocoso se relacionan con la excavación del Túnel Punta Olímpica, Áncash, 2025. (H0): La caracterización y el análisis descriptivo de la permeabilidad del macizo rocoso no se relacionan con la excavación del Túnel Punta Olímpica, Áncash, 2025. 2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS a) La caracterización del macizo en términos de fracturamiento, conductividad hidráulica y grado de saturación explica el comportamiento de la excavación. b) Las variaciones empíricas de permeabilidad determinan las condiciones de la excavación en los distintos tramos. c) La influencia de la permeabilidad en la estabilidad y el tipo de sostenimiento aplicado explica los resultados de la excavación del túnel.	Variable independiente (X): Permeabilidad del macizo rocoso Dimensiones e indicadores: <i>Fracturamiento:</i> densidad de fracturas (número/m), orientación de fracturas (dirección y buzamiento). <i>Conductividad hidráulica:</i> valor de permeabilidad (m/s) obtenido mediante ensayos Lugeon, caudal de infiltración (L/s). <i>Grado de saturación:</i> porcentaje de humedad en la roca (%), presión de poros (kPa). Variable dependiente (Y): Excavación del túnel Dimensiones e indicadores: <i>Avance:</i> metros lineales excavados por día, retrasos acumulados (días). <i>Estabilidad:</i> eventos de inestabilidad (derrumbes, desprendimientos), nivel de convergencia (cm). – <i>Sostenimiento:</i> tipo y cantidad de pernos o anclajes, espesor del revestimiento (cm).	Tipo: Aplicada. Nivel: Descriptivo correlacional. Enfoque: Cuantitativo. Diseño: No experimental, transversal. Ámbito de estudio: Túnel Punta Olímpica, corredor vial Carhuaz-Chacas-San Luis (Áncash). Población: Secciones estructurales del macizo rocoso dentro del túnel. Muestra: 10 tramos geotécnicos evaluados mediante perforaciones y ensayos Lugeon. Técnicas de recolección: Ensayos Lugeon, piezometría, observación estructurada, registro fotográfico. Instrumentos: Fichas de campo, piezómetros, equipo Lugeon tester, software AutoCAD, ArcGIS Pro y Excel.	Para caracterizar la permeabilidad del macizo rocoso del Túnel Punta Olímpica, se recomienda combinar métodos geológicos y geomecánicos, describir adecuadamente las discontinuidades y la matriz rocosa, y aplicar ensayos de permeabilidad en campo. Luego, la información obtenida debe vincularse con la estabilidad y el diseño del sostenimiento mediante sistemas como Q o RMR. 1. Evaluación y caracterización inicial La etapa inicial consiste en estudiar la geología del macizo, definir las propiedades de la roca intacta y describir sus discontinuidades. Con esa información se calculan índices como RQD, RMR y GSI, que permiten obtener una valoración preliminar de la calidad del macizo rocoso. 2. Caracterización específica de la permeabilidad La caracterización de la permeabilidad requiere realizar ensayos de bombeo o inyección para obtener el coeficiente hidráulico y analizar cómo circula el agua dentro del macizo fracturado, considerando que el flujo está dominado por la red de discontinuidades más que por la roca intacta. 3. Análisis descriptivo y relación con el diseño El análisis integra datos geológicos, geotécnicos e hidráulicos para describir cómo varía la permeabilidad a lo largo del túnel y cómo se relaciona con fallas, acuíferos y filtraciones observadas. Con esa información se definen los criterios de sostenimiento mediante sistemas como RMR, Q o GSI, y se determina si se requieren drenajes o inyecciones para controlar el ingreso de agua.